

Российская академия наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук

Научный совет
по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики



ГА-2016
~~~~~

ТРУДЫ XIII ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

# **ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАКУСТИКИ И ГИДРОФИЗИКИ**

Санкт-Петербург  
2016

УДК 681.88/89  
ББК 32.875  
Т 78

**Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики».** – Санкт-Петербург, 2016. – 516 с.

ISBN 978-5-00-105015-5

В сборнике трудов представлены доклады о достижениях отечественных и зарубежных ученых в области гидрофизики и гидроакустики. Особое внимание уделено результатам фундаментальных исследований и их внедрению при решении прикладных проблем, в том числе при разработке технологий мониторинга Мирового океана с целью исследования и освоения его ресурсов, предупреждения природных катастроф и чрезвычайных ситуаций, при изучении рельефа прибрежных акваторий и экономических зон, при обосновании методов и средств борьбы с подводным терроризмом и минной опасностью, при разработке датчиков и систем контроля и управления производственными процессами.

Для научных работников и инженеров, а также для широкого круга специалистов, интересующихся подводной акустикой и гидрофизикой.

Конференция проводилась в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском научном центре Российской академии наук (СПбНЦ РАН) с 24 по 26 мая 2016 г.

#### **Организации-соучредители:**

Научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики СПбНЦ РАН  
ОАО «Концерн «МПО - «Гидроприбор»      АО «Концерн «Океанприбор»

#### **Организационный комитет:**

##### **Председатель:**

д-р техн.наук А.А.Родионов  
(СПбНЦ РАН)

##### **Сопредседатель:**

канд.физ.-мат.наук С.А.Смирнов  
(АО «Концерн «Океанприбор»)

##### **Члены оргкомитета:**

канд.техн.наук Барбанель Б.А. (акад. РАЕН), д-р техн.наук Белов Б.П. (СПбГМТУ), Боровская А.В. (СПбНЦ РАН), д-р техн.наук Вергешев С.М. (ПГУ), канд.техн.наук Говорухин В.П. (СПБО СПП РАН), канд.техн.наук Гурьев А.В. (СПбФ ИО РАН), д-р техн.наук Гурьев Ю.В. (ВМИИ), д-р физ.-мат.наук Долин Л.С. (ИПФ РАН), д-р физ.-мат.наук Емельянов В.Н. (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им.Д.Ф.Устинова), канд.техн.наук Зенченко С.С. (ФГУП «Крыловский научный центр»), канд.физ.-мат.наук Зимин А.В. (СПбФ ИО РАН), канд.биол.наук Иванов М.П. (СПбГУ), канд.техн.наук Каверинский А.Ю. (ФГУП ЦКБ МТ «Рубин»), Кедрова Е.В. (АО «Концерн «Океанприбор»), д-р техн.наук Максимов В.В. (АО «Концерн «Океанприбор»), д-р техн.наук Малый В.В. (СПИИ РАН), акад. Нигматулин Р.И. (ИО РАН), канд.техн.наук Погудин К.Г. (ОАО «Концерн «МПО - Гидроприбор»), Покровская Н.Е. (СПбФ ИО РАН), канд.техн.наук Попов В.А. (АО «Концерн «Океанприбор»), акад. Румянцев В.А. (ИНОЗ РАН), канд.техн.наук Селезнев И.А. (АО «Концерн «Океанприбор»), канд.физ.-мат.наук Смирнов С.А. (АО «Концерн «Океанприбор»), д-р воен.наук Трушенков В.В. (ОАО «Концерн «МПО - Гидроприбор»), Тукиянен А.Н. (ОАО «СПМБМ «Малахит»), чл.-кор. РАН Филатов Н.Н. (ИВПС КарНЦ РАН), канд.техн.наук Черницкий В.В. (СПбФ ИО РАН), д-р техн.наук Щеголихин В.П. (1 ЦНИИ МО), чл.-кор. РАН Якушенко Е.И. (ВМИИ)

#### **Авторы-составители:**

д-р техн.наук Б.П.Белов, д-р техн.наук А.А.Родионов,  
канд.физ.-мат.наук С.А.Смирнов, д-р физ.-мат.наук Ф.Ф.Легуша

#### **Рецензенты:**

д-р техн.наук Б.П.Белов, д-р техн.наук А.В.Богородский, канд.техн.наук С.Б.Егоров, канд.физ.-мат.наук А.В.Зимин, д-р техн.наук Ю.А.Коваленко, д-р физ.-мат.наук Ф.Ф.Легуша, канд.техн.наук Г.В.Лоскутова, канд.техн.наук Д.А.Никитин, д-р техн.наук Д.Б.Островский, д-р техн.наук А.А.Родионов, канд.физ.-мат.наук М.А.Родионов, канд.геогр.наук Д.А.Романенков, д-р физ.-мат.наук В.А.Рябченко, д-р техн.наук И.А.Селезнев

ISBN 978-5-00-105015-5

© Коллектив авторов, 2016

3. Атлас максимальных заплесков цунами. Отв.ред. С.Л.Соловьев, Владивосток: МГИ АН УССР, ДВНИГМИ, 1978, 61 с.
4. Иконникова Л.Н. Опыт расчета элементов волн цунами // Тр. Центрального института прогнозов, М.: Гидрометеоздат, 1965, вып.142.
5. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Симонов К.В. О возможности локального долгосрочного прогноза цунами // Оперативный и долгосрочный прогноз цунами, Владивосток: ДВО АН СССР, 1983, С.150-162.
6. Kaistrenko V. Tsunami recurrence versus tsunami height distribution along the coast // Pure App. Geoph., 2011, V.168, No.11, P.2065-2069.
7. Gonzalez F., Geist E., Jaffe B. et al. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field sources // J. Geophys. Res., 2009, V. 114, C11023, doi: 10.1029/2008JC005132.
8. Leonard L., Roger G., Mazotti S. Tsunami hazard assessment of Canada // Nat. Hazards. 2013, doi: 10.1007/s11069-013-0809-5.
9. Atwater B.F., Nelson A.R., Clague J.J. et al. Summary of coastal geologic evidence about past great earthquakes at the Cascadia subduction zone // Earthquake Spectra, 1995, V. 11, No.1, P.1-18.
10. Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г. Исследования палеоцунами на дальневосточном побережье России // Мировой океан. Том I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане. М.: Научный мир, 2013. С. 488-498.

### ЦУНАМИ В ЧЕРНОМ МОРЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.А.Бейзель, канд. физ.-мат. наук, В.К.Гусяков, д-р физ.-мат. наук, Л.Б.Чубаров, д-р физ.-мат. наук  
Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

### TSUNAMI IN THE BLACK SEA: RESULTS OF NUMERICAL MODELING

S.A.Beisel, Ph.D., V.K.Gusakov, Dr., L.B.Chubarov, Dr.  
Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia

*В докладе представлены результаты анализа цунамиопасности российского побережья Черного моря, полученные с использованием системы модельных очагов цунамигенных землетрясений. Для определения очаговых зон Черного моря, создающих наибольшую угрозу для побережья Крыма и Краснодарского края, построена система из 144 модельных очагов, состоящая из трех параллельных цепочек, протягивающихся вдоль всего шельфа. Анализ интегральной энергетической характеристики показал, что для каждого участка российского побережья, помимо очагов, расположенных в непосредственной близости от него, существуют зоны на противоположном побережье, создающие сопоставимую угрозу цунами.*

*The report presents an analysis of the tsunami danger of the Russian Black Sea coast, obtained with the use of model sources of tsunamigenic earthquakes. To determine the focal areas of the Black Sea, creating the greatest threat to the coast of the Crimea and the Krasnodar Territory, the system of 144 model sources was built, consisting of three parallel chains, stretched along the shelf. Analysis of the integral energy characteristic of the action of different tsunamigenic earthquakes origins showed that for each parts of the Russian coast, in addition to the sources, located in the immediate vicinity, there are zones on the opposite southern coast creating a comparable level of threat to the tsunami.*

Рассмотренные авторами сценарии генерации и трансформации волн цунами основаны на системе модельных очагов, расположенных вдоль шельфа Черного моря и построенных с использованием исторического каталога черноморских цунами, созданного А.А.Никоновым [1] и расширенного им же в 2015 году более чем на треть. В настоящее время этот каталог покрывает период времени от 485 года до н.э по 2014 год и содержит 35 исторических событий, вызвавших цунами различной интенсивности. Среди них было несколько катастрофических событий (543, 1341, 1423), затронувших в той или иной мере весь бассейн. Наряду с классическими сейсмогенными цунами, возникающими в очаговой области сильного подводного землетрясения вследствие косейсмических смещений дна и/или динамического воздействия сейсмических волн на водную толщу, здесь известно много случаев цунами метеорологического, а также обвального и оползневого происхождения, причем последние могут не иметь прямой связи с сейсмической активностью. Анализ географического распределения очагов черноморских цунами показывает, что они могут возникать практически по всей периферии моря.

**Землетрясения и цунами в акватории Черного моря.** Сейсмическая активность в районе Черного моря фиксируется практически во всех частях шельфа и его подножья. За период инструментальных наблюдений (1900-2014) в пределах акватории здесь произошло 46 землетрясений с магнитудой  $M_w \geq 5$ . Из них 18 имели  $M_w \geq 5.5$ , 7 –  $M_w \geq 6.0$ , 3 –  $M_w \geq 6.5$ , 1 –  $M_w \geq 7$ . По-видимому, сильнейшее за время инструментальных наблюдений землетрясение в акватории Черного моря произошло в 1901 г. вблизи мыса Калиакра (Болгария) и имело магнитуду 7.2. В последующие более чем 100 лет сейсмичность этой области не выделялась повышенной активностью по сравнению с другими районами акватории. В пределах центральной части глубоководной котловины Черного моря также происходят отдельные землетрясения, однако сейсмическая активность котловины моря существенно ниже, сильнейшие зафиксированные события не достигают  $M_w = 5.0$ . Принимая во внимание относительно ровный рельеф дна котловины, можно заключить, что вероятность сильного цунамигенного события здесь минимальна. Следует, однако, подчеркнуть, что длительность инструментального каталога и представительность

(полнота) данных по современной сейсмичности Черного моря недостаточны для получения надежных оценок повторяемости и предельных магнитуд землетрясений в его акватории. Поэтому привлечение данных об исторических землетрясениях и цунами в Черном море является совершенно необходимым.

Исторический каталог сильнейших землетрясений Черного моря [1] начинается с 485 года до н.э. и содержит около 50 землетрясений, вызвавших ущерб и человеческие жертвы и нашедших отражение в исторических хрониках. Положение их очагов оценивается на основании макросейсмических данных, при этом точность оценки местоположения очага может варьироваться в пределах  $\pm 1-2^\circ$ , величины магнитуды –  $\pm 1$  балл. Из пространственного расположения очаговых зон этих событий следует, что подавляющее большинство разрушительных и сильных землетрясений возникало на периферии Черного моря с очевидной концентрацией вдоль имеющего субширотное простирание Северо-Анатолийского разлома. Другим местом концентрации очагов сильных землетрясений и сопровождавших их цунами является Мраморное море и пролив Босфор. Построенная карта очагов цунами в акватории Черного моря за весь исторический период указывает положения 35 очаговых зон, цунами и цунамиподобные явления от которых были зарегистрированы в различных частях побережья.

Анализ содержания каталога черноморских цунами показывает, что механизмы возникновения цунами в Черном море отличаются большим разнообразием. Вполне вероятно, что некоторые случаи аномальной волновой активности в акватории Черного моря могли иметь и метеорологическую природу (метео-цунами) [2]. Все это, вместе с неполнотой и недостаточной детализацией исторических данных, особенно в отношении высот наката волн на берег, делает задачу вероятностной оценки цунамиопасности Черного моря достаточно сложной, требующей комплексирования различных методик. Тем не менее с уверенностью можно сказать, что сильные цунамигенные события в Черном море, сопровождавшиеся значительными разрушениями и человеческими жертвами, происходили на протяжении всего исторического времени (почти 2.5 тыс. лет) на регулярной основе и, очевидно, будут происходить и в будущем.

При построении уточненной системы модельных очагов, аппроксимирующих основные цунамигенные зоны Черного моря, положение и магнитуды модельных очагов в конкретных зонах выбирались на основе анализа данных для региона Черного моря из глобальных сейсмологических каталогов за период с 1900 г. по 2014 г., их механизмы – по данным каталога СМТ (1976-2015гг.) и по сведениям о преобладающих типах механизмов в исследуемой зоне. Главное отличие совокупности модельных очагов от множества очагов исторических цунами в Черном море заключается в том, что модельные очаги располагаются и в тех районах черноморского побережья (например, северо-западный край его шельфа), для которых нет исторических сведений о цунамигенных событиях, однако данные современной сейсмичности указывают на возможность возникновения в них подводных землетрясений.

Из-за недостаточности инструментальных данных по региону в ряде случаев механизмы модельных очагов выбирались по малому числу (вплоть до 1–2) инструментальных определений, что недостаточно для обоснования подобного выбора, а также для исключения других вариантов механизмов. Поэтому для исследования вопроса об относительном вкладе различных очаговых зон акватории Черного моря в цунамиопасность российского побережья была построена более однородная система модельных очагов, в которой в качестве механизмов были приняты вертикальные взбросы, как наиболее опасный вариант механизма с точки зрения условий возникновения цунами. Эта система, ставшая основой для проведения сценарных расчетов, состоит из трех линий по 48 модельных очагов с магнитудой  $M_w=7.8$ , расположенных у прибрежной кромки (линия *a*), середины (линия *b*) и глубоководного края (линия *c*) шельфа, равномерно (с шагом около 50 км) распределенных вдоль всей береговой линии.

**Результаты расчетов.** Сценарные расчеты выполнялись на сетке с шагом в 30 угловых секунд на 12 часов физического времени по разработанной авторами методике с использованием созданного ими программного комплекса MGC [3], вычислительные модули которого реализуют алгоритмы модифицированного варианта конечно-разностной схемы Мак-Кормака [4], аппроксимирующей классические уравнения модели мелкой воды, записанные в сферической системе координат.

В результате были получены распределения максимальных, за все время расчета, амплитуд в каждой точке расчетной области, показывающие направленность излучения энергии каждым модельным очагом и ее дальнейшую эволюцию при распространении цунами по акватории Черного моря, а также максимальные положительные и отрицательные смещения поверхности моря во всех береговых точках расчетной области. Анализ таких распределений позволяет выявить наиболее опасные для побережья Крыма и Краснодарского края положения цунамигенных источников.

В качестве некоторой интегральной энергетической характеристики опасности воздействия конкретного очага на каждый из двух участков российского побережья (Крым и Краснодарский край) рассматривалась величина, определяемая путем интегрирования (суммирования) вдоль защищаемого участка побережья квадратов сумм абсолютных величин максимальных и минимальных значений уровня за все время расчета. Эта величина может рассматриваться в качестве меры доли энергии цунами, пришедшей к этим участкам от конкретного источника, на основании которой можно сравнивать относительную цунамиопасность очагов, расположенных в различных зонах.

Анализ этих характеристик для побережья Крыма (рис. 1) и побережья Краснодарского края (рис. 2)

подтверждает, что наиболее опасными являются очаги, расположенные непосредственно вблизи рассматриваемого побережья (очаги № 10–16 для Крыма и № 17–23 для Краснодарского края). Именно они порождают там волны с наибольшими амплитудами. При удалении очагов (вдоль берега) от рассматриваемых участков побережья опасность существенно (в 2–3 раза) снижается, однако для обоих участков возникает второй максимум, связанный с очагами, расположенными на противоположном берегу Черного моря (очаги № 36–40 для Крыма и № 30–36 для Краснодарского края). В некоторых зонах наиболее опасными являются очаги из цепочки (с), что может быть связано с большими глубинами воды для модельных очагов из этой цепочки вследствие чего они приводят в движение существенно больший объем воды по сравнению с очагами из прибрежной области [5].

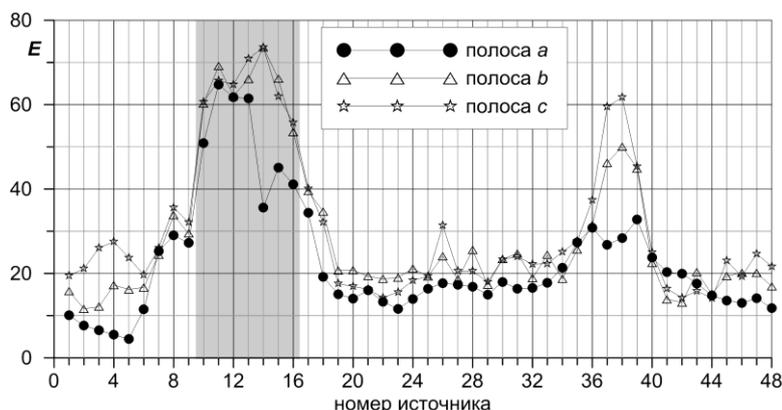


Рис. 1. Интегральная энергетическая характеристика  $E$  вдоль побережья Крыма для модельных источников с магнитудой  $M_w=7.8$ , расположенных вдоль полос  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Цветом выделена зона модельных очагов, расположенных непосредственно перед побережьем Крыма.

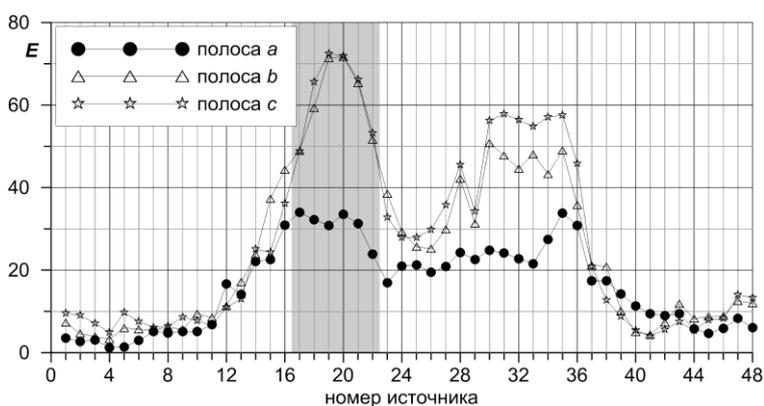


Рис. 2. Интегральная энергетическая характеристика  $E$  вдоль побережья Краснодарского края для модельных источников с магнитудой  $M_w=7.8$ , расположенных вдоль полос  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Цветом выделена зона модельных очагов, расположенных непосредственно перед побережьем Краснодарского края.

*Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00219). Авторы признательны А.В.Ландеру за предоставленные материалы по инструментальной сейсмичности Черного моря.*

#### Литература

1. Никонов А.А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли, 1997, №1, с.86-96.
2. Vilibic' I., Monserrat, S., and Rabinovich, A.B. Meteorological tsunamis on the US East Coast and in other regions of the World Ocean, Natural Hazards, 2014, 74, 1-9; doi: 10.1007/s11069-014-1350-x.
3. Чубаров Л.Б., Бабайлов В.В., Бейзель С.А. Программа расчета характеристик волн цунами сейсмического происхождения MGC // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2011614598.
4. Маккормак Р.В. Численный метод решения уравнений вязких течений // Аэрокосмическая техника. 1983. Том 1. № 4. С. 114 – 123.
5. Iida K. The generation of tsunamis and the focal mechanism of earthquakes // Tsunamis in the Pacific ocean, Honolulu, East-West Center Press, 1970. P.3-18.