

смаатриваемых лет. Относительное содержание озона на этих высотах может снижаться на 50–60% по сравнению со средними модельными значениями. Эти изменения существенно превосходят сопутствующее им уменьшение (на 10–25%) общего содержания озона в атмосфере.

Отмеченная связь изменений содержания озона на высотах 30–40 км с перемещениями основных барических систем стратосферы и с положением полярного вихря показывает важную роль динамики стратосферы в распределении озона в этом слое. Вместе с тем для объяснения наблюдавшихся на миллиметровых волнах значительных изменений содержания озона необходимо учитывать влияние на его распределение не только динамических, но и фотохимических процессов, роль которых возрастает в слоях выше 30 км. Полученные результаты содержат новую важную информацию об изменениях, происходящих в озоносфере. Обнаруженное истощение озонового слоя над Московским регионом требует дальнейших наблюдений за его состоянием.

Авторы выражают глубокую благодарность чл.-корр. РАН И. И. Собельману за поддержку работы, а также Г. М. Крученицкому и Т. В. Кадыгровой (ЦАО) и Т. С. Кружковой (Гидрометцентр) за предоставленные данные аэрологического зондирования.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96-02-19093а).

#### Литература

1. Собельман И.И., Соломонов С.В., Сороченко Р.Л. // Вестн. РАН. 1993. **63**, № 8. С. 721.
2. Solomonov S.V., Rozanov S.B., Kropotkina E.P. et al. // Proc. SPIE. 1998. **3406**.
3. Solomonov S.V., Kropotkina E.P., Lukin A.N. et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1994. **56**, № 1. P. 9.
4. Соломонов С.В., Кротопкина Е.П., Лукин А.Н. и др. // Изв. РАН, ФАО. 1993. **29**, № 4. С. 525.
5. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В. и др. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М., 1983.
6. Gaikovich K.P. // Digest Int. Geosciences and Remote Sensing Symp. Pasadena, California, USA, Aug. 8–12, 1994. V. 4. P. 1901.
7. Keating G.M., Chiou L.S., Hsu N.C. // Adv. Space Res. 1996. **18**, № 9/10. P. 11.
8. Бюллетень о состоянии озонового слоя / Под ред. А.А. Черникова. Вып. 10. Долгосрочный: Изд. ЦАО, 1996.

УДК 551.466.62

## ОЦЕНКА УРОВНЯ ЦУНАМИОПАСНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

С. Ф. Доценко

**Дан обзор современного состояния исследований цунами в Черном море. Представлены обобщенные физико-географические характеристики исторических цунами по мареографическим данным и сведениям описательного характера. Выделены вероятные зоны генерации катастрофических волн. Описаны физические закономерности распространения цунами в открытой части и шельфовой зоне моря, установленные методами численного моделирования.**

Катастрофическим цунами подвержены прибрежные и островные территории Тихого океана, Средиземного моря, Восточной Атлантики, Карибского бассейна и ряда других регионов Мирового океана [1–3]. В перечне значимых природных катастроф на Земле в 1963–1992 гг. цунами по экономическому ущербу, числу пострадавших и числу погибших людей занимает соответственно 9, 11 и 12-е место (лидирующую роль играют наводнения, тропические ураганы, засухи, эпидемии, нашествия насекомых, землетрясения и ряд иных явлений [4]).

Не вызывает сомнения необходимость оценок цунамиопасности в прибрежных зонах повышенной сейсмоактивности при проектировании гидротехни-

ческих сооружений различного назначения. Потери от цунами неизменно высоки, особенно для развивающихся стран [4]. Ежегодно сильные цунами в Тихом океане причиняют ущерб, оцениваемый в 8 млн долларов США, и отнимают 300 человеческих жизней [5].

Не свободен от опасных природных явлений и район Черного моря, где неоднократно наблюдались сильные наводнения, землетрясения, штормы, оползни, аномальные ледовые режимы. Они сопровождались значительными экономическими потерями для черноморских государств.

Цунамиопасность региона определяется интенсивностью возникавших цунами и повторяемостью эк-

стремальных событий. Для Черного моря этот вопрос изучен слабо в силу низкой повторяемости явления и весьма скромного объема натуральных данных. Тем не менее поскольку цунами здесь возникали и не исключена возможность их образования в будущем, представляет интерес общая характеристика цунамиопасности Черноморского бассейна.

### 1. Исторические цунами в Черном море

Цунами в Черном море — сравнительно редкое природное явление. Все известные к настоящему времени подобные события можно разделить на две группы. К первой относятся те, которые в силу исторической давности не были зарегистрированы инструментально, но описаны очевидцами, упомянуты в летописях или легендах. Пункты побережья и годы этих событий указаны на рис. 1, обобщающем данные статей [6–11].

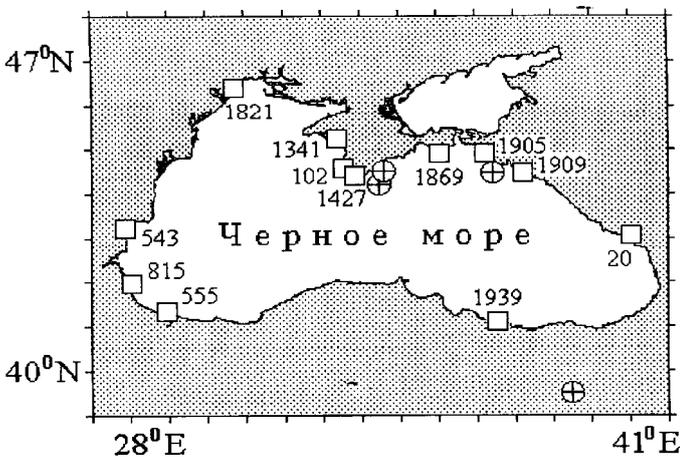


Рис. 1. Известные цунами в Черном море (пункты побережья и годы возникновения), инструментально не зарегистрированные. Знаком ⊕ отмечены эпицентры четырех землетрясений, вызвавших зарегистрированные цунами вдоль Крымского и Кавказского побережий

Цунами наблюдались на многих участках побережья Черного моря. Исторические свидетельства позволяют достаточно уверенно утверждать, что цунами в районах Сухуми (20 г. нашей эры), Севастополя (102 г.), Варны (543 г.), Фороса (1427 г.) и на восточном побережье моря в 1909 г. носили разрушительный характер, имели высоты 3–5 м и были вызваны сейсмическими источниками.

В работах [6–13] описаны характеристики четырех инструментально зарегистрированных цунами. Они сопутствовали Ялтинским землетрясениям 26 июня и 11–12 сентября 1927 г. с магнитудами по шкале Рихтера  $M = 5,5$  и  $6,5$  соответственно, разрушительному Эрзинджанскому землетрясению 26 декабря 1939 г. ( $M = 7,9$ – $8,0$ ) на северо-востоке Турции и подводному землетрясению 12 июля 1966 г. ( $M = 5,8$ ) в районе г. Анапы. Эпицентры этих землетрясений указаны на рис. 1. Цунами 1939 г. вызвано

землетрясением с эпицентром на суше в 150 км от берега [9].

### 2. Обобщенные характеристики и региональные особенности черноморских цунами

Представленные в работах [6–13] данные позволяют дать обобщенные характеристики зарегистрированных цунами. Диапазоны изменения параметров волн таковы: максимальные высоты в различных пунктах побережья —  $0,03 \div 0,53$  м; средние периоды  $T = 8 \div 107$  мин; длины волн  $\lambda = CT = 86 \div 120$  км ( $C$  — скорость распространения длинных волн). В большинстве случаев цунами характеризовались первоначальным подъемом уровня моря, а первая волна не была максимальной по высоте. Хотя высоты зарегистрированных цунами в пунктах наблюдения не превысили 0,53 м, в некоторых бухтах Крымского полуострова, например в Балаклавской, они составили 1–2 м [6].

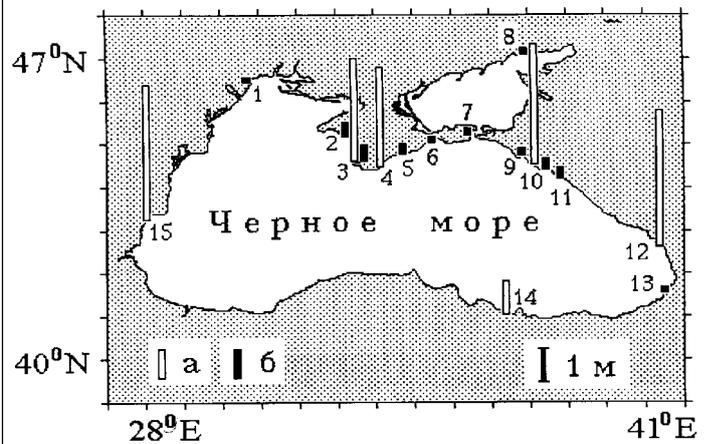


Рис. 2. Высоты исторических цунами в Черном море по описаниям (а) и по мареографическим данным (б): 1 — Одесса, 2 — Евпатория, 3 — Севастополь, 4 — Форос, 5 — Ялта, 6 — Феодосия, 7 — Керчь, 8 — Мариуполь, 9 — Новороссийск, 10 — Геленджик, 11 — Туапсе, 12 — Сухуми, 13 — Батуми, 14 — Фатса, 15 — Варна

Информация, приведенная в отмеченных выше статьях, позволяет построить карту высот исторических цунами вдоль побережья Черного моря (рис. 2). В целом их диапазон весьма широк: от нескольких сантиметров до нескольких метров. Волны цунами 11–12 сентября 1927 г. и 12 июля 1966 г. прошли через Керченский пролив, пересекли Азовское море и были зафиксированы в Мариуполе [8]. Сильно выражена неравномерность распределения высот черноморских цунами вдоль побережья моря.

Определенное по мареограммам время распространения цунами до ближайших к очагу участков побережья составило 5–8 мин. Для удаленных точек акватории моря оно значительно больше. Так, при событиях 1927 г. волны распространялись в течение 189 мин до Одессы и 290 мин до Мариуполя.

Отметим ряд особенностей черноморских цунами, некоторые из которых отражают специфику Азово-Черноморского бассейна.

Цунами в Черном море возбуждались как при подводных землетрясениях, так и при землетрясениях на суше. В силу ограниченности бассейна можно ожидать многократного отражения волн от берегов, что косвенно подтверждается усилениями колебаний уровня после периодов относительного затишья. Отмечено прохождение волн из Черного в Азовское море через Керченский пролив. Весьма вероятны захват волн шельфом и их вдольбереговое распространение. Крымский полуостров частично экранирует волны зонального направления: в Одессе отмечены слабые отголоски цунами. Колебания уровня являются модулированными, что указывает на пакетную структуру волнового поля. Наконец, цунами приводили к возбуждению или усилению сейш в бухтах Черного моря.

### 3. Наиболее вероятные зоны сейсмической генерации черноморских цунами

По современным представлениям, основной причиной образования цунами являются резкие вертикальные смещения протяженных участков морского дна или горизонтальные сдвиги подводных склонов в соответствии с теорией упругой отдачи [14]. К цунамигенным в Тихом океане отнесены подводные землетрясения с магнитудами  $M \geq 7$ . Для Черного моря пороговое значение  $M$  не определено в силу отсутствия точной информации о сильных цунами и землетрясениях прошлых веков.

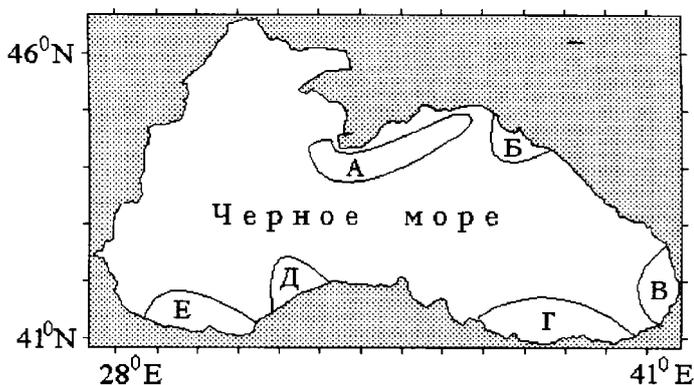


Рис. 3. Наиболее вероятные зоны сейсмической генерации цунами в Черном море

Общая характеристика сейсмичности Черноморской впадины, опирающаяся на данные 1900–1986 гг., приведена в работах [15, 16]. Приведенные в них карты очагов землетрясений позволяют выделить шесть наиболее вероятных цунамигенных зон (рис. 3): южный участок шельфа Крымского полуострова (зона А), Западно-Кубанскую (Б), Сухумскую (В) и три зоны (Г, Д и Е) вдоль Турецкого побережья. В зонах В–Е возможна генерация цунами как подводными землетрясениями, так и землетрясениями на суше. Помимо этого в работе [16] на основе анализа первичных материалов сделан важный вывод о сейсмичности центральной части Черноморской впадины, которая ранее считалась асейсмичной.

В настоящее время Черное море «переживает» период сейсмического спокойствия и нет предпосылок для образования катастрофических цунами. Два последних наиболее сильных подводных землетрясения ( $M = 6,0$ ) зафиксированы в 1945 и 1951 гг. в западной части моря. С тех пор не было событий с  $M > 5$ . Однако нет оснований для исключения возможности возникновения подводных землетрясений с магнитудами  $M = 7, 0-7, 5$  [16], которые могут сопровождаться сильными цунами.

### 4. Численное моделирование черноморских цунами

Имеющийся объем результатов наблюдений не позволяет описать процесс развития явления в Черном море. В подобных случаях эффективными, а часто и единственными методами изучения физических закономерностей и региональных особенностей цунами являются вычислительные [17] и лабораторные [18] эксперименты, позволяющие изучать волновой процесс от этапа генерации до выхода волн на берег.

Применительно к Черному морю лабораторные эксперименты не проводились. Что касается вычислительных экспериментов, то для рассматриваемого бассейна реализованы три численные прогностические модели: лучевая модель (ЛМ), одномерная (ЭМ1) и двумерная (ЭМ2) эволюционные модели.

ЛМ описывает рефракцию поверхностных волн в приближении геометрической оптики. Расчет волновых лучей опирается на решение задачи Коши для системы трех обыкновенных дифференциальных уравнений [19]:

$$x' = C(x, y) \cos \theta, \quad y' = C(x, y) \sin \theta,$$

$$\theta' = C_x(x, y) \sin \theta - C_y(x, y) \cos \theta,$$

$$x(0) = x_0, \quad y(0) = y_0, \quad \theta(0) = \theta_0,$$

где  $x(t)$ ,  $y(t)$  — горизонтальные координаты точки на луче в момент времени  $t$ ,  $\theta(t)$  — угол наклона касательной к лучу в точке  $(x, y)$ ,  $C = \sqrt{gH(x, y)}$  — скорость распространения длинных волн,  $H = H(x, y)$  — глубина бассейна,  $(x_0, y_0)$  — координаты источника волн,  $g$  — ускорение свободного падения.

В случае сосредоточенного источника генерации рассчитываются лучи, выходящие из точки  $(x_0, y_0)$  с равномерным шагом по азимутальному углу  $\theta_0$ . Для протяженного источника необходимо находить лучи, выходящие по нормали к границе очага цунами. Точки на лучах в момент времени  $t$  образуют волновой фронт (изохрону).

ЛМ позволила определить времена распространения цунами до различных пунктов побережья [20],

а также изучить характер рефракции волн, излученных из зон генерации исторических цунами [10] и вероятных цунамигенных районов Черного моря [21], указанных на рис. 3.

Типичная карта волновых фронтов в случае генерации цунами точечным сейсмическим источником на материковом склоне Крымского полуострова представлена на рис. 4,а. Время прохождения волнами моря в зональном направлении составляет около 110 мин, в меридиональном — 30 мин. Для ближайших к очагу цунами участков побережья оно составляет 5–10 мин. Столь малое время подхода волны цунами делает малоэффективными оперативные мероприятия по защите населения и хозяйственных объектов в зоне береговой черты.

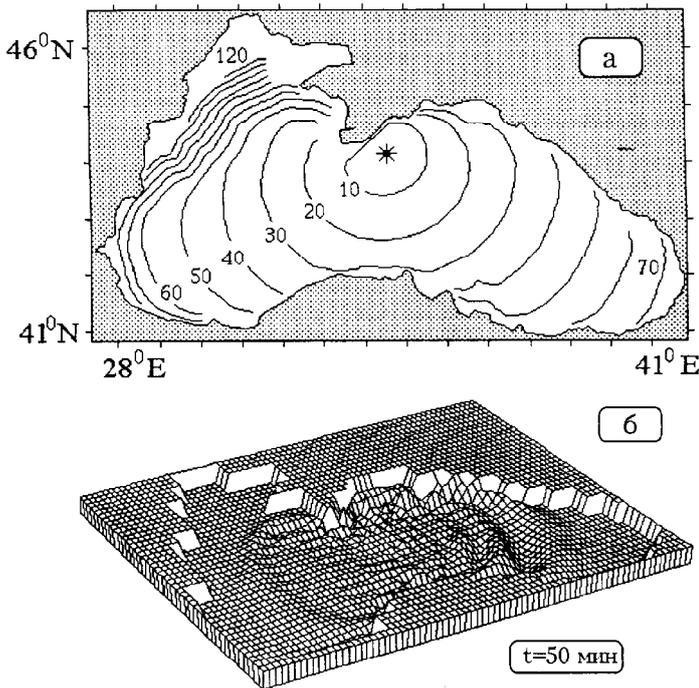


Рис. 4. Структура волны цунами в рамках лучевой (а, указано время распространения волн в минутах) и эволюционной (б) моделей для источника генерации на материковом склоне Южного берега Крыма

Вычислительные эксперименты подтвердили сильную угловую анизотропию излучения энергии из зон сейсмической генерации цунами, вызванную захватом волн материковым склоном и шельфом. По этой причине можно ожидать, что цунами, возникшие в восточной части моря, безопасны для западных участков побережья и наоборот.

Эволюционные модели позволяют прогнозировать высоты волн цунами в открытой и шельфовой зонах моря по известному начальному смещению поверхности моря (ЭМ2), моделирующему отклик морской среды на подводное землетрясение, или по заданным параметрам волны при подходе к материковому склону (ЭМ1).

Модель ЭМ2 в длинноволновом приближении применена для анализа черноморских цунами в работах [13, 22]. Конечно-разностным методом (сетка

$75 \times 45$  точек, шаг 15 км) решалась задача Коши

$$u_t - lv = -g\zeta_x - kH^{-1}u\sqrt{u^2 + v^2},$$

$$v_t + lv = -g\zeta_y - kH^{-1}v\sqrt{u^2 + v^2},$$

$$\zeta_t + (Hu)_x + (Hv)_y = 0,$$

$$u = v = 0, \quad \zeta = \zeta_0(x, y) \quad (t = 0)$$

с условием непротекания жидкости на боковой границе бассейна. Здесь  $u, v$  — осредненные по вертикали горизонтальные проекции скорости,  $\zeta$  — смещения поверхности моря,  $l$  — параметр Кориолиса,  $k = 2,6 \cdot 10^{-3}$  — коэффициент придонного трения.

В случае поднятия уровня моря в эллиптической области с осями 120 и 50 км, расположенной в Крымской сейсмоактивной зоне и ориентированной вдоль изобат, образуется волна, показанная на рис. 4,б. Преобладает передача волновой энергии в восточном и западном направлениях. Формированию знакопеременного профиля волны предшествовали этапы отражения от крымского и турецкого участков побережья моря. Наиболее интенсивны волны, распространяющиеся на восток.

Модель ЭМ1 позволяет достичь высокого пространственно-временного разрешения и детально рассмотреть трансформацию и усиление волн при распространении над материковым склоном и шельфом моря [23].

Для описания распространения волн в области  $0 \leq x \leq L$ , включающей материковый склон и шельф, может быть использована система уравнений

$$u_t + uu_x = -g\zeta_x - kD^{-1}u|u|, \quad \zeta_t + (Du)_x = 0,$$

$D = \zeta + H$ , с условиями

$$\zeta = \zeta_0(\lambda/2 - C_0t), \quad u = (C_0/H_0)\zeta_0(\lambda/2 - C_0t)$$

$$(x = 0, \quad t \leq T) \quad (1)$$

свободного входа в расчетную область заданной одиночной волны  $\zeta = \zeta_0(x + \lambda/2 - C_0t)$  длины  $\lambda$  через глубоководную мористую границу  $x = 0$  ( $T = \lambda/C_0$ ) и условием непротекания  $u = 0$  на прибрежной границе  $x = L$ , в качестве которой выступает вертикальная стенка на 10-метровой изобате. При  $t > T$  условия (1) целесообразно заменить на

$$u_t - C_0u_x = 0, \quad \zeta = -(H_0/C_0)u \quad (x = 0)$$

для обеспечения свободного выхода отраженных волн из расчетной области.

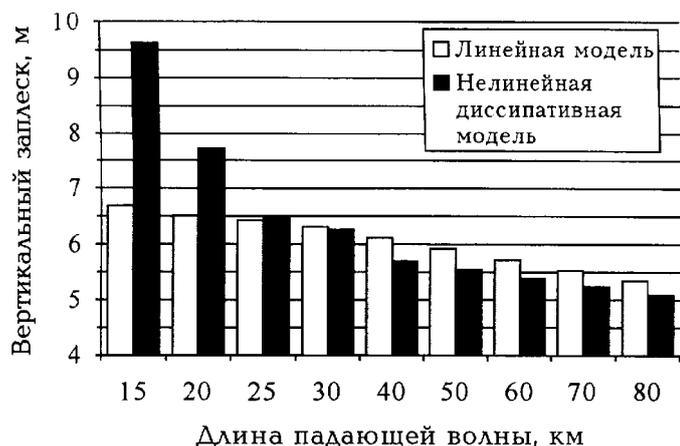


Рис. 5. Заплески волн цунами на вертикальную стенку, расположенную на изобате 10 м у побережья Южного берега Крыма. Высота волны при подходе к материковому склону равна 1 м

На рис. 5 даны рассчитанные для шельфа Южного берега Крыма вертикальные заплески одиночных волн, имеющих высоту 1 м и различную длину при подходе к материковому склону. Вертикальные заплески убывают с ростом  $\lambda$ . Для относительно коротких волн принципиально важен учет нелинейности процесса. Установлено слабое влияние донного трения на трансформацию волн в шельфовой зоне. Существенным является тот факт, что во всех случаях вычислительный эксперимент выявил многократное усиление волн в шельфовой зоне. Поэтому подобные события представляют потенциальную опасность для жизнедеятельности в прибрежной зоне моря.

#### Литература

1. Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С. Каталог цунами в Тихом океане. 1969–1982 гг. М., 1986.
2. Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С. и др. Цунами в Средиземном море 2000 г. до н.э. — 1991 г. М., 1997.

3. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами. Л., 1981.
4. Осипов В.И. // Вестн. РАН. 1995. 65, № 6. С. 483.
5. Soloviev S.L. Tsunamis // Assessment and Mitigation of Earthquake Risk. Paris: UNESCO, 1978. P. 118.
6. Григориаш З.К. // Тр. МГИ АН СССР. М., 1959. 17. С. 59.
7. Григориаш З.К., Корнева Л.А. // Океанология. 1969. 9, № 6. С. 988.
8. Григориаш З.К. // Тр. СахКНИИ ДВО АН СССР. Южно-Сахалинск, 1972. Вып. 29. С. 271.
9. Григориаш З.К., Корнева Л.А. // Океанология. 1972. 12, № 3. С. 417.
10. Доценко С.Ф. // Изв. РАН, ФАО. 1994. 30, № 4. С. 513.
11. Никонов А.А. // Природа. 1994. № 3. С. 72.
12. Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н. // Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические исследования. Санкт-Петербург, 1991. С. 352.
13. Доценко С.Ф., Коновалов А.В. // Морской гидрофиз. журн. 1995. № 6. С. 3.
14. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М., 1985.
15. Чекунов А.В. // Докл. АН УССР. 1990. Сер. Б, № 11. С. 27.
16. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. // Геофиз. журн. 1991. № 3. С. 14.
17. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Марчук Ан.Г., Симонов К.В. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами. Новосибирск, 1989.
18. Кононкова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн. М., 1985.
19. Алешков Ю.З. Теория волн на поверхности тяжелой жидкости. Л., 1981.
20. Доценко С.Ф. // Морской гидрофиз. журн. 1993. № 2. С. 39.
21. Доценко С.Ф. // Там же. 1995. № 5. С. 3.
22. Доценко С.Ф., Коновалов А.В. // Там же. 1995. № 1. С. 67.
23. Доценко С.Ф. // Там же. 1997. № 4. С. 21.