

УДК 551.466.62+550.344.42

Оперативный прогноз цунами на Дальнем Востоке

Ю.П. Королёв

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Российская Федерация, 693022,
г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 16
E-mail: y.korolev@imgg.ru

Ключевые слова:
цунами,
оперативный
прогноз цунами,
ложная тревога
цунами,
цунами в Тохоку
2011 г.,
чилийское цунами
2014 г.

Тезисы. Побережье Дальнего Востока подвержено такому опасному природному явлению, как цунами. Цунами представляет угрозу не только для населения, сооружений на берегу, судов, находящихся у причалов, но и для объектов на шельфе. Задача обеспечения безопасности в данном случае состоит в том, чтобы службы предупреждения объявляли обоснованные тревоги, дифференцированные по степени опасности для конкретных участков побережий. Согласно современным представлениям, тревога цунами должна объявляться только в тех пунктах, в которых цунами несет реальную опасность, и сопровождаться информацией о времени прихода первой волны, высотах волн, времени прихода и высоте максимальной волны, а также об ожидаемом времени окончания цунами (отбой тревоги цунами).

Предложен способ оперативного прогноза цунами, позволяющий на основе информации о цунами в открытом океане с достаточной заблаговременностью давать подробный прогноз ожидаемого цунами в любом пункте. Способ работает в режиме реального времени. Для выполнения прогноза от сейсмологической службы требуются данные только о координатах эпицентра землетрясения.

Работоспособность предлагаемого способа подтверждена численными экспериментами по моделированию процесса оперативного прогнозирования цунами в Тохоку (2011 г.) и Чили (2014 г.). Способ может применяться не только централизованной службой предупреждения о цунами, но и любым пунктом, который имеет возможность принимать в режиме реального времени информацию о цунами от удаленных станций измерения уровня в открытом океане.

Цунами относится к числу серьезных стихийных бедствий, наносящих большой ущерб, нередко с человеческими жертвами. Побережье Дальнего Востока, в особенности Камчатки и Курильских островов, подвержено этому стихийному явлению.

Цунами представляет собой длинную волну на мелкой воде. Ее длина много больше глубины океана. При распространении цунами захватывает всю толщу воды. Поэтому неоднородности дна океана – подводные возвышенности, хребты – влияют на распространение волны, играя роль фокусирующих линз, волноводов.

При движении цунами вдоль границ океанов серьезное воздействие на волны оказывает континентальный шельф. Шельф как протяженная область вдоль границы континента является своего рода волноводом, вдоль которого волны способны распространяться на большие расстояния без заметного ослабления. Отражаясь поочередно от берега и границы шельфа, волны могут усиливаться, а также сопровождаются течениями вдоль шельфа [1]. Тогда они запаздывают относительно головной волны на несколько периодов, но имеют заметно большие амплитуды. Такой эффект наблюдался во время симуширского цунами 2006 г. в Кресент-Сити (штат Калифорния, США), когда волны с большими амплитудами достигли города уже после отбоя тревоги цунами. Аналогичная картина наблюдалась во время чилийского цунами 2010 г. в Северо-Курильске.

Вблизи береговой черты в бухтах, проливах возбуждаются сейшевые колебания. Сложная картина волновых движений наглядно продемонстрирована многочисленными видеосвидетельствами цунами в Тохоку 11 марта 2011 г., выложенными в интернете. Как собственно цунами, так и перечисленные сложные явления – краевые волны, течения, сопровождающие цунами, – оказывают воздействие на берега и могут влиять на различные объекты освоения шельфа.

Тихоокеанское побережье Дальнего Востока подвержено не только локальным цунами, возникающим в Курило-Камчатской зоне и у восточного побережья Японии,

но и удаленным цунами. Известно, что цунами, возникающие у побережья Чили, являются потенциально опасными для побережий российского Дальнего Востока. Во время чилийского цунами 1960 г., возникшего в результате землетрясения магнитудой 9,5, на побережье п-ова Камчатка и Курильских островов зарегистрированы заплески высотой до 7 м [2].

Очевидно, что цунами невозможно предотвратить, но можно заблаговременно предупредить об опасности. В настоящее время действующим способом предупреждения о цунами является сейсмологический, или магнитудно-географический, разработанный в середине прошлого века. После сильных трансокеанских цунами середины XX в. (алеутское 1946 г., камчатское 1952 г.) в тихоокеанских странах с целью предупреждения о цунами были созданы соответствующие национальные службы. Российская служба предупреждения о цунами (СПЦ) создана в 1958 г. В силу статистического характера используемого способа предупреждения о цунами до 2009 г. службы цунами объявили большое количество (до 80 %) ложных тревог, нередко допуская пропуски. Тревога объявляется на побережьях большой протяженности без информации об ожидаемых высотах цунами. Понятие «ложная тревога цунами» до сих пор не имеет строгого определения. Согласно действующему регламенту, тревога цунами считается оправдавшейся, если хотя бы на одном участке побережья заплеск цунами составлял 1 м. В то же время высоты цунами на других участках могут быть незначительными. В таких случаях тревога цунами становится оправданной для одних и ложной для других участков побережья. Примерами таких тревог могут служить тревоги во время симуширских цунами 2006 и 2007 гг. Названные цунами сопровождалась заплесками до 20 м на ближайших к очагу незаселенных средних Курильских островах Симушир, Матуа, Кетой [3], в то время как на южных Курилах максимальные амплитуды составляли 40–70 см [4, 5]. Такие волны не представляют угрозы. Тем не менее эти тревоги согласно регламенту относят к оправдавшимся. Во всех случаях тревога сопровождалась эвакуацией населения, экстренным выходом судов на рейд или в открытое море [5]. Ложные тревоги цунами не только создают неоправданные стрессовые ситуации для населения, но и приносят значительный материальный

ущерб, связанный с остановкой производства, любой деятельности в опасных местах, выводом судов в открытое море. Объявление тревог цунами, оказавшихся впоследствии фактически ложными в пунктах, где ожидалось цунами, не свидетельствует о неудовлетворительной работе службы предупреждения, ответственной за объявление тревог и действующей в строгом соответствии с установленным регламентом, а демонстрирует несовершенство сейсмологического способа прогноза цунами. При многообразии волновых процессов, сопровождающих цунами, невозможно на основании исключительно сейсмологических данных (практически только магнитуды землетрясения) давать адекватный прогноз цунами, тем более адресный.

Проблема оперативного прогноза цунами заключается в том, чтобы службы предупреждения объявляли не только обоснованные общие тревоги, но и дифференцированные по степени опасности для конкретных участков побережий. Идеально тревога цунами должна объявляться только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную опасность, и сопровождаться информацией о времени прихода первой и максимальной волн, их амплитудах, а также об ожидаемом времени окончания цунами (отбой тревоги цунами) [6, 7]. Актуальность этой задачи в дальнейшем будет только возрастать в связи с освоением не заселенных в настоящее время Средних Курильских островов.

В соответствии с идеей академика С.Л. Соловьёва информация удаленных от побережья станций измерения уровня моря позволит обеспечить достоверность, оперативность, достаточную заблаговременность прогноза цунами. Способы прогноза, основанные на информации о цунами в открытом океане, называются гидрофизическими способами предупреждения о цунами. В настоящее время только в Тихом океане установлено более 40 глубоководных донных станций измерения уровня океана [8]. Данные этих станций используются для оценки степени опасности цунами при оперативном прогнозе в нештатном режиме [9, 10].

Один из возможных способов оперативно прогноза цунами описан далее.

Способ оперативного прогноза цунами

В рамках федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного

и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года» предложен оригинальный способ расчета формы волны цунами в любой заданной точке вблизи побережья по данным об уровне океана в удаленной от побережья точке [6]. В дальнейшем способ модифицирован [11].

Для расчета формы ожидаемого цунами в любой точке A по данным о цунами в удаленной от побережья точке M предложено соотношение

$$\zeta(s, A) = \zeta(s, M) \cdot F(s, M, A),$$

где s – параметр интегрального преобразования; $\zeta(s, A)$ – спектр (образ интегрального преобразования) формы ожидаемого цунами; $\zeta(s, M)$ – спектр цунами в открытом океане; $F(s, M, A)$ – передаточная функция, представляющая собой отношение спектров расчетных форм волн $\zeta_2(s, A)$ и $\zeta_2(s, M)$ в точках A и M соответственно от вспомогательного источника, центр которого совпадает с эпицентром землетрясения, вызвавшего цунами:

$$F(s, M, A) = \zeta_2(s, A) / \zeta_2(s, M).$$

Передаточная функция строится в режиме реального времени после получения информации о координатах эпицентра землетрясения. Обратное интегральное преобразование дает форму ожидаемого цунами в любом заданном пункте A .

Способ не опирается на конкретный механизм землетрясения, его магнитуду, размер очага, поэтому возможен прогноз цунами, возбуждаемых различными механизмами, в частности в результате взрыва подводного вулкана или схода подводного оползня. Для выполнения прогноза от сейсмологической подсистемы необходима информация только о координатах эпицентра землетрясения. При этом нет необходимости расширять сеть сейсмологических станций. Прогноз выполняется в режиме реального времени.

Заблаговременность прогноза определяется суммарно временем пробега цунами до точки регистрации в открытом море, временем распознавания цунами (первый полупериод – первый период длительностью 15–30 мин) и временем, необходимым для эвакуации населения из опасных мест и вывода судов в открытое море.

Модифицированный способ обеспечивает расчет формы ожидаемого цунами произвольной длительности. Достаточно большая длительность прогноза позволяет учесть возможные вторичные волны, нередко имеющие амплитуды, значительно превышающие амплитуды головных волн, а также оценить необходимую продолжительность вероятной тревоги цунами. Способ не требует создания гигантских баз расчетных мареограмм и может применяться местными службами предупреждения о цунами, любыми объектами, если имеется возможность получения данных о цунами от удаленных станций в режиме реального времени.

В силу произвольности выбора вспомогательного источника для построения передаточной функции способ оперативного прогноза цунами является приближенным. Однако выявляет все особенности распространения волн, включая волноводные эффекты дна океана, краевые эффекты. В настоящее время способом не предусмотрен расчет массовых скоростей (скоростей течения) в волне цунами. Оценки в принятом для описания цунами приближении «мелкой воды» для модуля массовой скорости u дают $u \approx \zeta(g/D)^{1/2}$, где ζ – текущая амплитуда волны; g – ускорение силы тяжести; D – глубина моря в месте оценки.

Применение способа

Способ применялся для моделирования (ретроспективного прогноза) большинства цунами последнего десятилетия и показал свою работоспособность. Далее представлены результаты моделирования цунами 2011–2014 гг. Расчетная схема изображена на рис. 1. Координаты станций системы DART и данные об уровне океана доступны на сайте Национального управления океанических и атмосферных исследований США (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) [8].

Цунами Тохоку 11 марта 2011 г. Сильное землетрясение с магнитудой 9,0 произошло у северо-восточного побережья о. Хонсю с эпицентром в точке с координатами 38,297° с.ш., 142,373° в.д. [2]. Цунами 11 марта 2011 г. было необычным: амплитуда цунами превышала величину, предсказываемую расчетами для землетрясения магнитудой 9,0. Первоначальная амплитуда волны, возникшей после главного толчка, составляла 2 м. Спустя 11 мин амплитуда

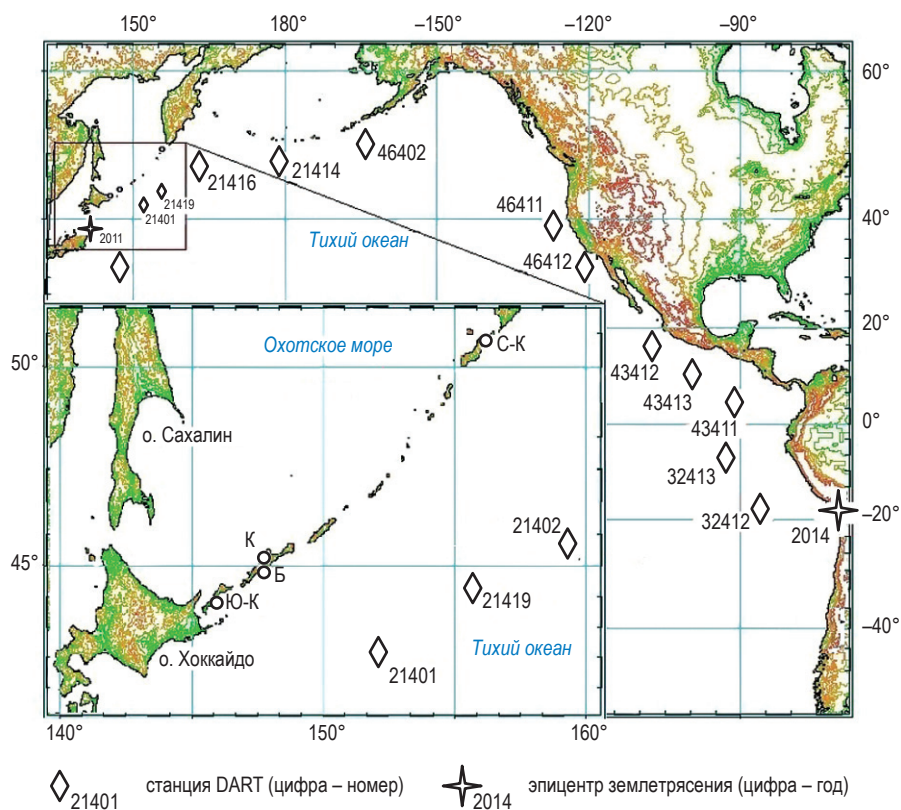


Рис. 1. Расчетная схема численных экспериментов:

Б – «Буревестник» (зал. Касатка, о. Итуруп); К – Курильск (о. Итуруп);
С-К – Северо-Курильск (о. Парамушир); Ю-К – Южно-Курильск (о. Кунашир)

неожиданно увеличилась до 5 м. Качественное объяснение этого эффекта дано Г. Парарасом-Караяннисом [12]. Предположительно, эффект аналогичен эффекту подводного оползня.

Расчет формы волны цунами в точках вблизи пунктов Курильских островов, а также в месте нахождения ближайшей к островам станции DART 21419 выполнен по данным российской станции DART 21401 (первый полупериод волны равен 20 мин). Длительность прогнозируемого цунами 9 ч. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Несмотря на аномальный механизм возбуждения цунами Тохоку 11.03.2011, расчет, выполненный по данным станции измерения уровня DART 21401 с использованием информации только о координатах эпицентра землетрясения без привлечения дополнительной сейсмологической информации, подтверждается не только инструментальными измерениями (DART 21419, Южно-Курильск, Курильск), но и другими свидетельствами – данными судового эхолота (Северо-Курильск),

визуальными наблюдениями (портпункт «Буревестник») [13].

Время пробега цунами до ближайшей станции DART 21401 составило 58 мин. С учетом времени распознавания цунами в точке регистрации (первый полупериод длительностью 20 мин) предварительный прогноз мог быть дан через 78–80 мин после главного толчка землетрясения. Заблаговременность расчетов составляет для Южно-Курильска 48 мин, для Курильска – 40 мин, для Северо-Курильска – 120 мин.

Заблаговременность расчета для портпункта «Буревестник» составляет 20 мин [14]. Этого времени не достаточно для своевременного объявления тревоги цунами и эвакуации населения. Для «Буревестника», а также пунктов Малой Курильской гряды в данном случае тревога должна объявляться в соответствии с действующим на основе магнитудного метода регламентом.

Чилийское цунами 2014 г. Землетрясение магнитудой 8,2 произошло 1 апреля 2014 г.

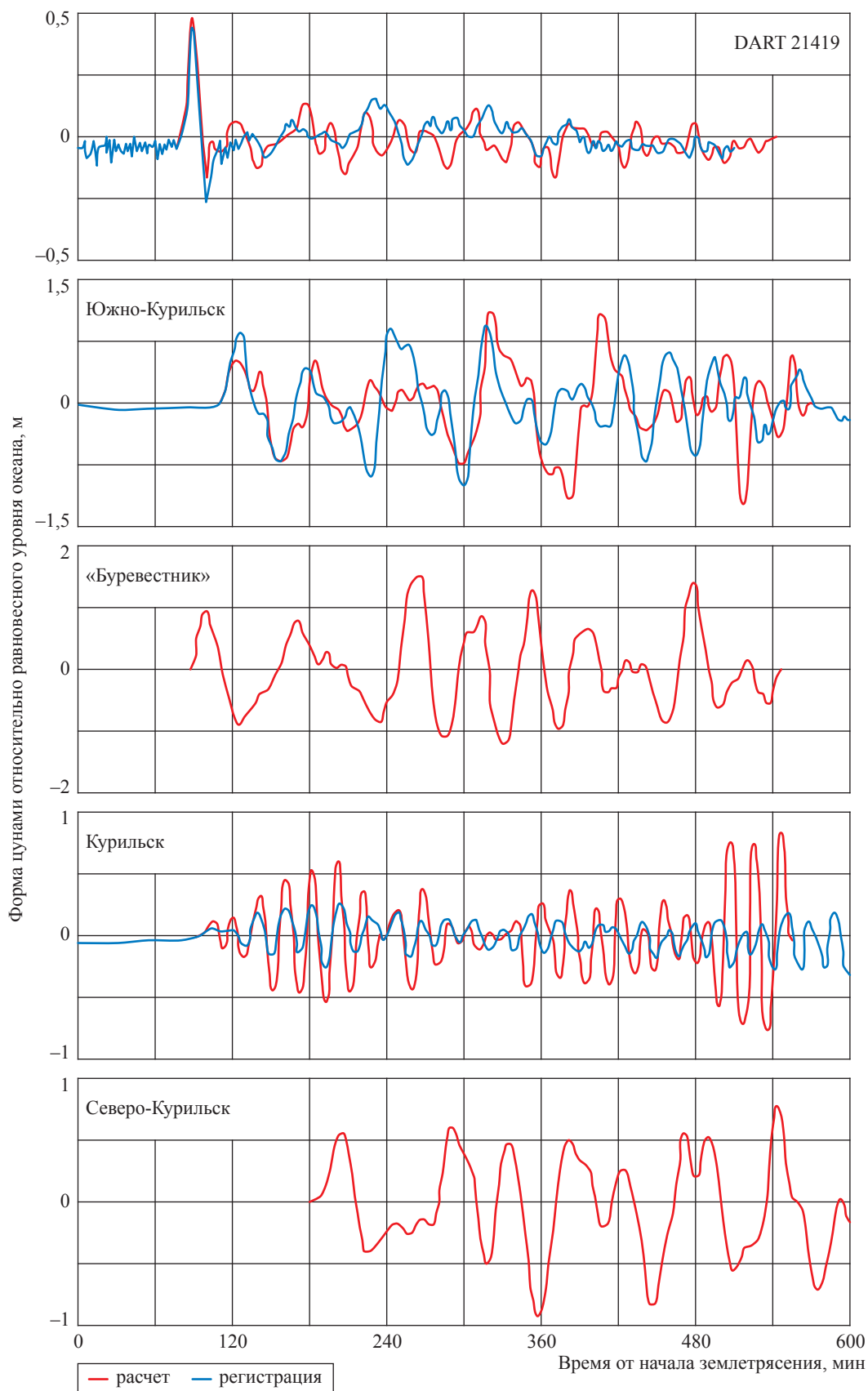


Рис. 2. Расчетные и зарегистрированные формы цунами 11.03.2011

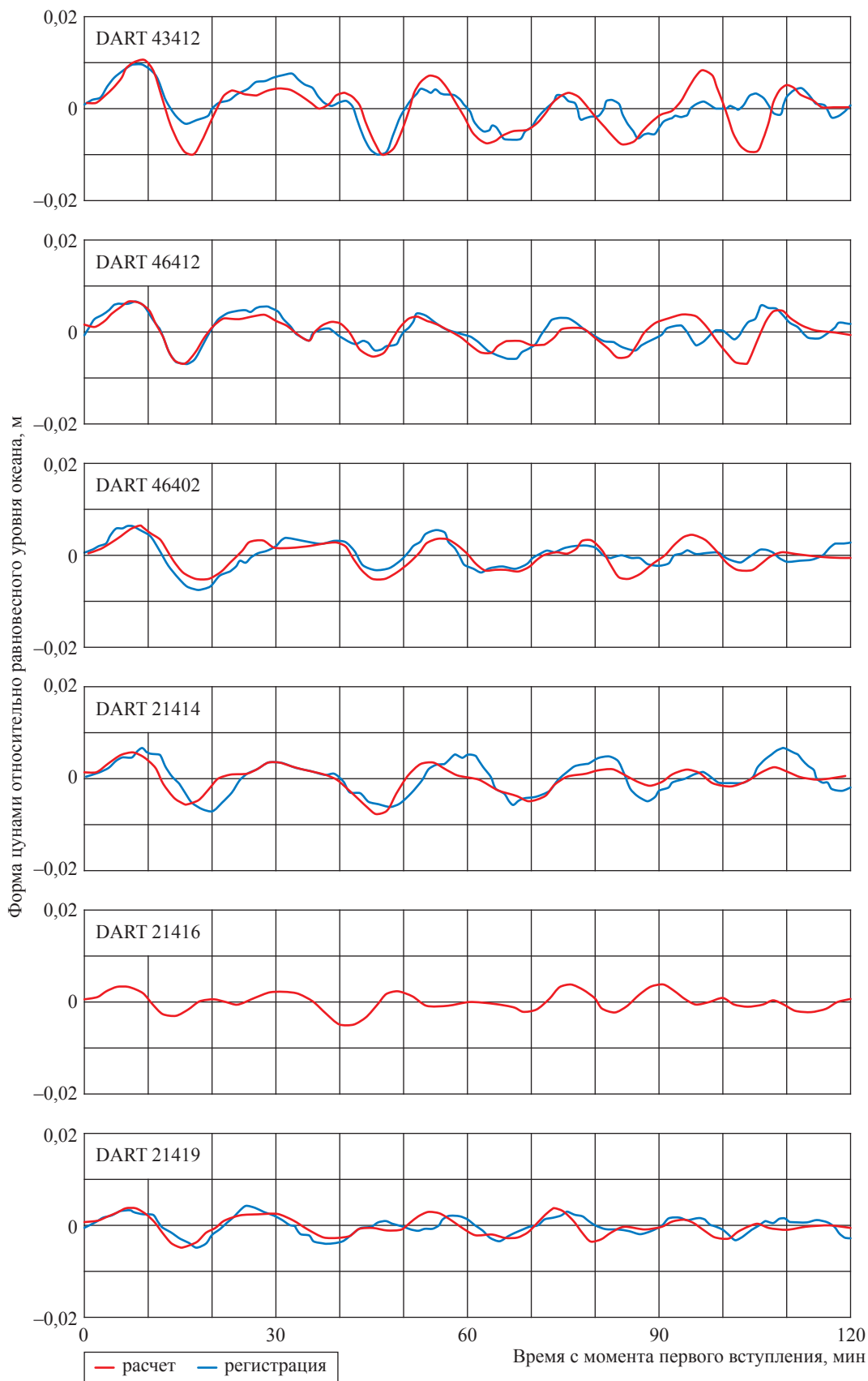


Рис. 3. Расчетные и зарегистрированные станциями DART формы цунами 2014 г. в океане

в 23:46 UTC у северного побережья Чили с эпицентром в точке с координатами 19,642° ю.ш., 70,817° з.д. [2]. На побережьях Чили, Эквадора и Коста-Рики объявили тревогу цунами и провели эвакуацию населения с опасных территорий. Возникшее цунами вызвало затопление ближайшего к очагу участка побережья Чили высотой до 4 м [2].

К моменту начала расчетов были доступны данные станции DART 32413, взятые в качестве опорных, по которым выполнялся прогноз (3 первых периода волны длительностью 71 мин). Расчеты в промежуточный момент времени сравнивались с имевшимися на этот момент фактическими данными в некоторых точках. Результаты представлены на рис. 3. При распространении от Калифорнии вдоль западного побережья США и Алеутских островов

до Курил и Японии цунами оставалось практически неизменным: сохранялись форма волны и амплитуда 0,5–1,0 см.

Достаточно хорошее совпадение результатов расчета с формами цунами, зарегистрированного в открытом океане станциями DART, позволило надеяться на адекватность прогноза для Курильских островов. Соответствующий расчет цунами был выполнен после перехода на разностную сетку с более подробной батиметрией. Единственной станцией вблизи Курил, зарегистрировавшей цунами в течение 150 мин, является DART 21419 (рис. 4).

В Северо-Курильске на о. Парамушир (расстояние 1,1 км к востоку от порта, глубина воды 16 м; см. точку С-К на рис. 1) прогнозировались головные волны амплитудой до 4 см, время прихода цунами – 2 апреля 2014 г.

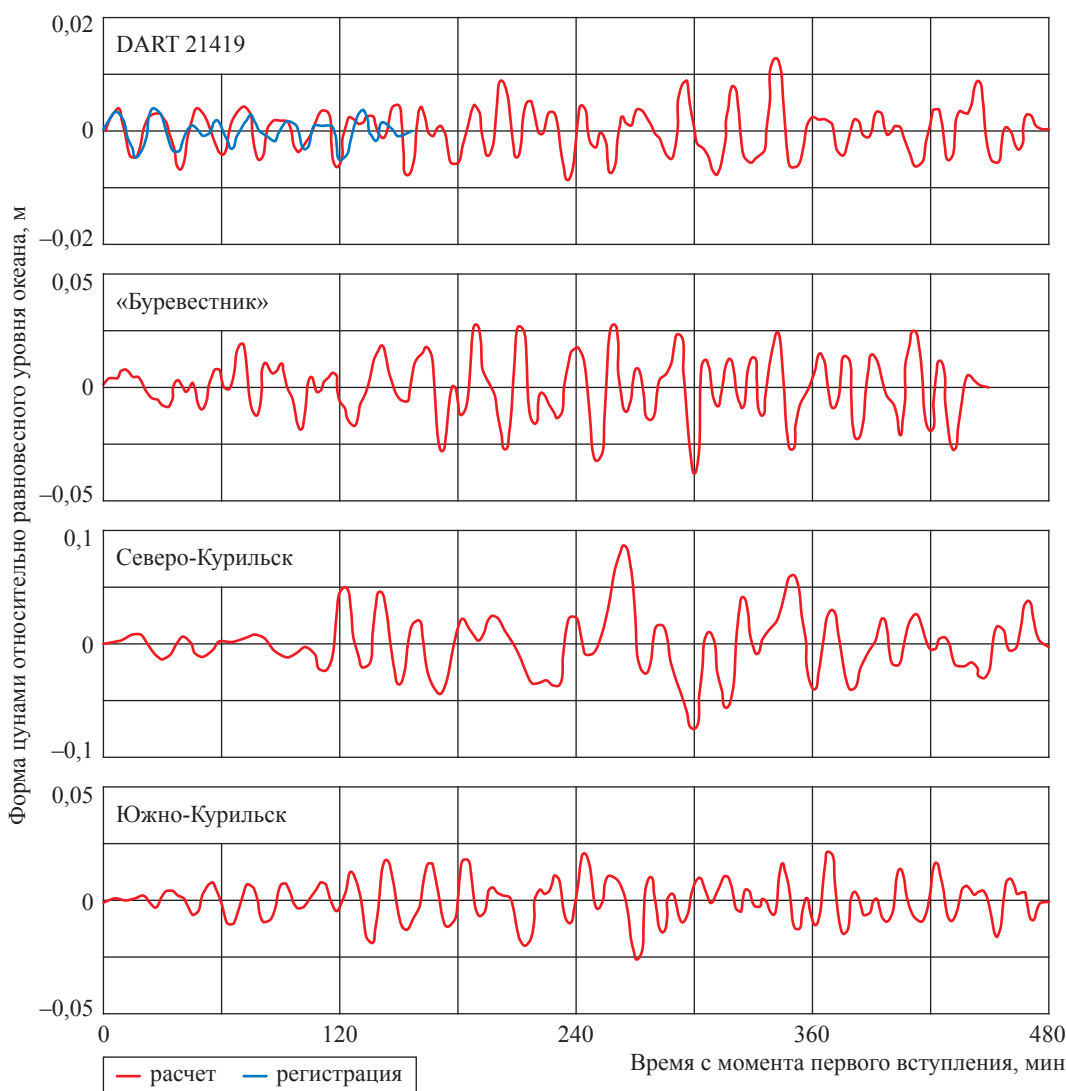


Рис. 4. Прогноз формы цунами 2014 г. в точках вблизи Курильских островов

в 20:40 UTC (3 апреля в 07:40 по сахалинскому времени). Структура прогнозированной волны цунами в Северо-Курильске аналогична структуре цунами 2010 г.: приход волн с максимальными амплитудами до 8 см с запозданием относительно первого вступления на 3,5 ч.

В Южно-Курильске на о. Кунашир (расстояние 5,4 км к востоку от порта, глубина воды 29 м; см. точку Ю-К на рис. 1) прогнозировались волны амплитудой до 3 см, ожидаемое время прихода цунами – 2 апреля 2014 г. в 21:40 UTC (3 апреля в 08:40 по сахалинскому времени). В портпункте «Буревестник» на о. Итуруп (расстояние 2 км от берега, глубина 30 м, см. точку Б на рис. 1) 2 апреля 2014 г. в 21:20 UTC (3 апреля в 08:20 по сахалинскому времени) ожидалась волны с амплитудами до 3 см. В других пунктах Курильских островов прогнозировались волны амплитудой до 3 см.

Прогноз чилийского цунами 1 апреля 2014 г. на побережье Курил впервые в России выполнен практически в режиме реального времени [15]. Сравнение результатов расчета цунами в океане с данными станций DART демонстрирует достаточно высокую точность расчета волновых форм.

Прогноз для Курильских островов получен за 9,5–10,5 ч до прихода волны к их побережью. На основании этих расчетов возможно было принять решение о необъявлении тревоги цунами.

Показано, что цунами представляет собой не только волну, падающую на берег нормально, но и сопутствующие волны, распространяющиеся вдоль шельфа, – волны, обусловленные

резонансом на шельфе, в бухтах, проливах. Все эти процессы необходимо учитывать при проектировании работ на шельфе.

Представленный в статье способ является одним из возможных способов оперативного прогноза цунами. Результаты применения способа оперативного прогноза цунами показывают, что качества прогноза, осуществляемого заблаговременно, достаточно для принятия решения об объявлении тревоги цунами, причем существует возможность заранее установить те пункты, в которых цунами представляет реальную угрозу. Рассчитанная форма ожидаемого цунами позволяет определить главные характеристики цунами: время первого вступления, амплитуды волн, время прихода и амплитуду максимальных волн, а также время окончания цунами. Таким образом, прогноз цунами предложенным способом отвечает всем требованиям, сформулированным в определении оперативного прогноза цунами МОК ЮНЕСКО [16].

Для выполнения расчетов предложенным способом необходима информация только о координатах эпицентра землетрясения и данные удаленных станций измерения уровня океана. Прогноз цунами может выполняться не только региональными центрами цунами, но и самостоятельно любым пунктом, который имеет возможность получения информации о координатах эпицентра землетрясения и данных об уровне океана со станций системы DART.

Предложенный способ оперативного прогноза цунами при реализации его в едином программном комплексе может служить инструментом, который позволит повысить качество оперативного предупреждения о цунами, существенно уменьшив количество ложных тревог цунами.

Список литературы

1. Ефимов В.В. Волны в пограничных областях океана / В.В. Ефимов, Е.А. Куликов, А.Б. Рабинович и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 280 с.
2. NGDC/WDS Tsunami Event Database / NOAA national centers for environmental information. – <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7>
3. Левин Б.В. Проявления цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков / Б.В. Левин, В.М. Кайстренко, А.В. Рыбин и др. // Докл. Академии наук. – 2008. – Т. 419. – № 1. – С. 118–122.
4. Лобковский Л.И. Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) / Л.И. Лобковский, А.Б. Рабинович, Е.А. Куликов и др. // Океанология. – 2009. – Т. 49. – № 2. – С. 181–197.
5. Тихонов И.Н. Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года / И.Н. Тихонов, Н.Ф. Василенко, Д.Е. Золотухин и др. // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27. – № 1. – С. 3–16.

6. Королёв Ю.П. Расчет цунами по измерениям уровня моря в удаленных точках при оперативном прогнозе / Ю.П. Королёв // Океанология. – 2004. – Т. 44. – № 3. – С. 376–382.
7. Королёв Ю.П. Ретроспективный краткосрочный прогноз Андрияновского (Алеутские острова) цунами 1996 г. / Ю.П. Королёв // Океанология. – 2011. – Т. 51. – № 3. – С. 409–417.
8. National Data Buoy Center / NOAA. – <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>
9. Titov V.V. Tsunami forecasting / V.V. Titov; Eds. E.N. Bernard and A.R. Robinson // *The Sea*. – Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press, 2009. – V. 15. – P. 367–396.
10. Wei Y. Inverse algorithm for tsunami forecasts / Y. Wei, K.F. Cheung, G.D. Curtis et al. // *Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering*. – ASCE, 2003. – № 129 (2). – P. 60–69.
11. Korolev Yu.P. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events / Yu.P. Korolev // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2011. – V. 11. – P. 3081–3091. – doi:10.5194/nhess-11-3081-2011.
12. Pararas-Carayanis G. Tsunamigenic source mechanism and efficiency of the March 11, 2011 Sanriku earthquake in Japan / G. Pararas-Carayanis // *Science of Tsunami Hazards*. – 2011. – № 30 (2). – P. 126–152.
13. Кайстренко В.М. Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 г. на тихоокеанском побережье России / В.М. Кайстренко, Г.В. Шевченко, Т.Н. Ивельская // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2011. – Т. 38. – № 1. – С. 41–64.
14. Королёв Ю.П. О совершенствовании оперативного прогноза цунами на Дальнем Востоке / Ю.П. Королёв, Т.Н. Ивельская // III Научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г.: сб. докладов. – <http://emsd.ru/konf111009/pdf/sb/index.html>.
15. Королёв Ю.П. Об оперативном прогнозе цунами 1 апреля 2014 г. вблизи побережья Курильских островов / Ю.П. Королёв, В.Н. Храмушин // *Метеорология и гидрология*. – 2016. – № 4. – С. 86–91.
16. *Tsunami glossary / Intergovernmental Oceanographic Commission*. – Revised ed. – Paris: UNESCO, 2016. – http://ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442. – (Technical series 85).

Short-term tsunami forecast on the shore of Far East

Yu.P. Korolev

Institute of Marine Geology & Geophysics of Far East Branch of RAS, Bld. 1b, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation
E-mail: y.korolev@imgg.ru

Abstract. The coast of the Far East is subject to such a dangerous natural phenomenon like the tsunami. Tsunamis are a danger not only to the population, onshore facilities, vessels at piers, but also for objects near the shoreline, on the shelf.

The problem is as follows. The tsunami alarm should be declared timely and selectively only for coastal areas where the tsunami will be of a real threat. According to modern concept, the short-term tsunami forecast consists in a quantitative estimate of any property of the tsunami hazard that is made in advance. Properties that may be forecasted include the time of initial wave arrival, the time of maximum wave arrival, the amplitude of the maximal tsunami waves, and the duration of the tsunami hazard.

The proposed method of tsunami forecast allows for detailed forecasting of the expected tsunami at any point based on information about the tsunami in the open ocean. The method operates in real time. To make the forecast, only data on location of the earthquake epicenter are required from the seismological service.

The efficiency of the proposed method was confirmed by numerical experiments on modeling the operational forecasting of the 2011 Tohoku and 2014 Chile tsunamis.

The method can be used both by regional tsunami warning service and by any facility, having access to the open-ocean level data in a real-time mode.

Keywords: tsunami, short-term tsunami forecast, false tsunami alarm, 2011 Tohoku tsunami, 2014 Chile tsunami.

References

1. YEFIMOV, V.V., Ye.A. KULIKOV, A.B. RABINOVICH et al. *Waves at boundary areas of ocean* [Volny v pogranichnykh oblastyakh okeana]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. (Russ.).
2. NGDC/WDS Tsunami Event Database [online]. In: *NOAA national centers for environmental information*. Available from: <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7>
3. LEVIN, B.V., V.M. KAYSTRENKO, A.V. RYBIN et al. Manifestations of a tsunami on November 15, 2006 at the Central Kuril Islands as a result of simulation of splash heights [Proyavleniya tsunami 15 noyabrya 2006 g. na tsentralnykh Kuril'skikh ostrovakh i rezultaty modelirovaniya vysot zapleskov]. *Doklady Akademii nauk*. 2008, vol. 419, no. 1, pp. 118–122. ISSN 0869-5652. (Russ.).
4. LOBKOVSKIY, L.I., A.B. RABINOVICH, Ye.A. KULIKOV et al. Kurila earthquakes and tsunamis on November 15, 2006 and January 13, 2007 (observations, analysis and numerical simulation) [Kuril'skiye zemletryaseniya i tsunami 15 noyabrya 2006 g. i 13 yanvarya 2007 g. (nabludeniya, analiz i chislennoye modelirovaniye)]. *Okeanologiya*. 2009, vol. 49, no. 2, pp. 181–197. ISSN 0030-1574. (Russ.).
5. TIKHONOV, I.N., N.F. VASILENKO, D.Ye. ZOLOTUKHIN et al. Simushir earthquakes and tsunamis on November 15, 2006 and January 13, 2007 [Simushir'skiye zemletryaseniya i tsunami 15 noyabrya 2006 goda i 13 yanvarya 2007 goda]. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2008, vol. 27, no. 1, pp. 3–16. ISSN 0207-4028. (Russ.).
6. KOROLEV, Yu.P. Calculating tsunami by measurements of sea level in the remote points during an operative forecast [Raschet tsunami po izmereniyam urovnya moray v udalennykh tochках pri operativnom prognoze]. *Okeanologiya*. 2004, vol. 44, no. 3, pp. 376–382. ISSN 0030-1574. (Russ.).
7. KOROLEV, Yu.P. Retrospective short-term forecast of the Andreanof tsunami (the Aleutian Islands) of 1996 [Retrospektivnyy kratkosrochnyy prognoz Andreyanovskogo (Aleut'skiye ostrova) tsunami 1996 g.]. *Okeanologiya*. 2011, vol. 51, no. 3, pp. 409–417. ISSN 0030-1574. (Russ.).
8. NOAA. National Data Buoy Center [online]. Available from: <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>
9. TITOV, V.V. Tsunami forecasting. *The Sea*. Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press, 2009, vol. 15: E.N. BERNARD and A.R. ROBINSON (eds.). Tsunamis, pp. 367–396.
10. WEI, Y., K.F. CHEUNG, G.D. CURTIS et al. Inverse algorithm for tsunami forecasts. *Journal of Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering*. ASCE, 2003, no. 129(2), pp. 60–69. ISSN 0733-950X.
11. KOROLEV, Yu.P. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011, vol. 11, pp. 3081–3091. ISSN 2195-9269. doi:10.5194/nhess-11-3081-2011.
12. PARARAS-CARAYANIS, G. Tsunamigenic source mechanism and efficiency of the March 11, 2011 Sanriku earthquake in Japan. *Science of Tsunami Hazards*. 2011, no. 30(2), pp. 126–152. ISSN 8755-6839.
13. KAYSTENKO, V.M., G.V. SHEVCHENKO and T.N. IVELSKAYA. Manifestations of the Tohoku tsunami on March 11, 2011 at the Russian coastline of Pacific Ocean [Proyavleniya tsunami Tohoku 11 marta 2011 g. na tikhookeanskom poberezhye Rossii]. *Voprosy inzhenernoy seismologii*. 2011, vol. 38, no. 1, pp. 41–64. ISSN 0132-2826. (Russ.).
14. KOROLEV, Yu.P. and T.N. IVELSKAYA. On perfection of operative tsunami forecasting at the Far East [O sovershenstvovanii operativnogo prognoza tsunami na Dalnem Vostoke]. In: *Proc. of the III Scientific-engineering conference "Issues for complex geophysical monitoring of Russian Far East", Petropavlovsk-Kamchatskiy, October 9–15, 2011* [online]. Available from: http://emsd.ru/files/konf111009/pdf/sb/Sekciya_Cunami/Korolew_Iwelskaya.pdf. (Russ.).
15. KOROLEV, Yu.P. and V.N. KHRAMUSHIN. Concerning the operative forecast of tsunami on April 1, 2014 nearby the coastline of Kuril Islands [Ob operativnom prognoze tsunami 1 aprelya 2014 g. vblizi poberezhya Kuril'skikh ostrovov]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2016, no. 4, pp. 86–91. ISSN 0130-2906. (Russ.).
16. INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION. *Tsunami glossary* [online]. Revised ed. Technical series 85. Paris: UNESCO, 2016. Available from: http://ioc-unesco.org/index.php?option=com_o&task=viewDocumentRecord&docID=10442.