

Научная статья

УДК 550.344.42+551.466.62  
EDN: JQDNES

DOI: 10.29039/0233-7584-2023-3-342-358

**Оценка эффективности  
экспресс-метода оперативного прогноза  
на примерах перуанского (2007 года),  
чилийских (2010, 2014 и 2015 годов) цунами**

**Ю. П. Королёв**

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия*  
✉ *Yu\_P\_K@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.10.2022; одобрена после рецензирования 10.11.2022;  
принята к публикации 09.03.2023.

*Аннотация*

*Цель.* Целью работы является изучение возможности оперативного прогнозирования цунами в условиях реального времени по данным глубоководных станций измерения уровня океана.

*Методы и результаты.* Экспресс-метод позволяет заблаговременно рассчитывать волновые формы ожидаемого цунами в океане, а также вблизи побережья. Для прогнозирования требуется сейсмологическая информация только о времени начала и координатах эпицентра землетрясения и данные одной станции измерения уровня океана, получаемые в режиме реального времени. В численных экспериментах использовались данные ближайших к очагам цунами глубоководных станций измерения уровня океана длительностью, равной первому полупериоду (первому периоду) цунами. Результаты расчета цунами 2007–2015 гг. достаточно хорошо совпадают с формами цунами, зарегистрированными глубоководными станциями в океане в различных направлениях от очага. Качество расчетов сопоставимо с качеством расчетов других авторов. Прогноз цунами в заданных точках возможен сразу после получения информации о прохождении первой волны цунами через ближайшую к очагу глубоководную станцию.

*Выводы.* В отличие от других способов, экспресс-метод не нуждается в построении сейсмического источника, не требует гигантской базы синтетических мареограмм. Экспресс-метод может применяться для прогноза цунами в тех областях, для которых другие способы не применимы (например, отсутствуют базы синтетических мареограмм). Такими областями являются побережья северо-западной части Тихого океана.

**Ключевые слова:** цунами, краткосрочный прогноз цунами, тревога цунами, ложные тревоги цунами, принцип взаимности, уровень океана, измерения уровня океана, службы предупреждения о цунами, Тихий океан

**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за полезные замечания и предложения, которые были учтены при доработке статьи.

**Для цитирования:** *Королёв Ю. П.* Оценка эффективности экспресс-метода оперативного прогноза на примерах перуанского (2007 года), чилийских (2010, 2014 и 2015 годов) цунами // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 3. С. 342–358. EDN JQDNES. doi:10.29039/0233-7584-2023-3-342-358

## Evaluation of the Express Method Effectiveness in Short-Term Forecasting on the Examples of the Peruvian (2007) and the Chilean (2010, 2014 and 2015) Tsunamis

Yu. P. Korolev

*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
✉ Yu\_P\_K@mail.ru*

### *Abstract.*

*Purpose.* The aim of the work is to study the possibility of real-time tsunami forecasting based on the data from the deep-ocean tsunameters.

*Methods and Results.* The express method makes it possible to compute in advance the waveforms of the expected tsunami in the ocean, as well as near the coast. Forecasting requires seismological information on the start time and coordinates of the earthquake epicenter only, and also the data from one deep-ocean tsunameter obtained in real time. The data from the deep-ocean tsunameters closest to the tsunami sources with the duration equal to the tsunami first half-period (the first period) were used in the numerical experiments. The results of computing tsunamis for 2007–2015 agree quite well with the tsunami forms recorded at the deep-sea stations in the ocean in different directions from the source. The quality of computations in the article is comparable to the computation quality of the other authors. A tsunami forecast at the given points is possible immediately after receiving the information on passing of the tsunami first period through the deep-sea tsunameter closest to the source.

*Conclusions.* In contrast to the other methods, no reconstructing of a seismic source neither a giant base of synthetic mareograms is required for the express method. The express method can be used for tsunami forecasting in those areas for which other methods are not applicable (for example, there is no a database of synthetic mareograms), namely the coast of the northwestern Pacific Ocean.

**Keywords:** tsunamis, short-term tsunami forecast, tsunami alarm, false tsunami alarms, reciprocity principle, ocean level, ocean level measurements, tsunami warning service, Pacific Ocean

**Acknowledgments:** The author is grateful to the reviewers for their useful comments and proposals which were taken into account when finalizing the paper.

**For citation:** Korolev, Yu.P., 2023. Evaluation of the Express Method Effectiveness in Short-Term Forecasting on the Examples of the Peruvian (2007) and the Chilean (2010, 2014 and 2015) Tsunamis. *Physical Oceanography*, 30(3), pp. 315-330. doi:10.29039/1573-160X-2023-3-315-330

### 1. Введение

Проблема оперативного прогноза цунами остается актуальной, особенно для северо-западной части Тихого океана. В большей степени это касается ситуаций с ложными тревогами цунами. Магнитудно-географический способ прогноза цунами, развитый в период становления служб предупреждения, остается основным до настоящего времени. Прогноз, основанный на этом способе, дает большое количество ложных тревог.

Для северо-западной части Тихого океана предупреждение о цунами выпускается Тихоокеанским центром предупреждения о цунами и региональными центрами Российской службы предупреждения о цунами на основе магнитудного критерия. Предупреждает об опасности цунами также Консультативный центр по цунами в северо-западной части Тихого океана (*Northwest Pacific Tsunami Advisory Center*) в лице Японского метеорологического агентства,

действующий в соответствии с новым регламентом <sup>1</sup>. Новый регламент основан на базе данных предварительных расчетов высот цунами в большом количестве точек вблизи побережий от множества сейсмических источников в цунамигенных зонах с наиболее вероятным механизмом землетрясения и различными магнитудами, а также глубинами гипоцентров. Прогноз дается для крупных регионов и позволяет лишь ориентировочно оценить опасность возникшего цунами. Принятие решения об объявлении тревоги цунами возлагается на региональные центры. Аналогичный подход к оперативному прогнозу цунами на Курильских островах предложен в работе [1]. Упомянутые способы не предполагают использования информации о цунами в океане и не дают достоверной количественной оценки высот ожидаемого цунами. Подобный подход предлагался еще в 1996 г. [2] в начале развития системы гидрофизических наблюдений в океане. Впоследствии он послужил основой для создания гидрофизического способа <sup>2</sup>, основанного на данных о сформировавшемся цунами в открытом океане [3–5].

При принятии решения об объявлении тревоги цунами российские центры предупреждения о цунами руководствуются магнитудно-географическим критерием и учитывают предупреждения, выпущенные Тихоокеанским центром предупреждения о цунами и Японским метеорологическим агентством, что часто приводит к объявлению ложных тревог цунами [6, 7]. В настоящей работе под ложной понимается тревога цунами, когда тревога объявляется, но высоты волн оказываются незначительными, не представляющими опасности.

Службы предупреждения о цунами не всегда оценивают оправданность тревог в соответствии с этим определением. Примером может служить событие 25.03.2020, когда в результате землетрясения с магнитудой 7,3 в 220 км восточнее о. Онекотан (северные Курильские острова) произошло слабое цунами [8]. Объявлялась тревога цунами с эвакуацией населения, но амплитуда волны была незначительной. Центр цунами рассматривает эту тревогу как оправдавшуюся.

Достоверно оценить степень ожидаемого цунами только по магнитуде землетрясения довольно сложно: не учитываются глубина океана в очаговой области, механизм землетрясения, глубина его гипоцентра [9]. Детализировать прогноз, основанный на магнитудном критерии, российская служба предупреждения о цунами не может ввиду отсутствия в России гидрофизической подсистемы. Россия является едва ли не единственной страной бассейна Тихого океана, не имеющей глубоководных станций измерения уровня океана, позволяющих осуществлять оперативный прогноз цунами.

Ложные тревоги цунами, часто объявляемые с излишней заблаговременностью, хотя и не наносят прямых потерь, но причиняют значительный

---

<sup>1</sup> Users' Guide for the Northwest Pacific Tsunami Advisory Center (NWPTAC): Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. Paris : UNESCO, 2019. 35 p. (IOC Technical Series ; no. 142). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366546?posInSet=1&queryId=d1288da0-390e-47b1-8a51-a529b04abf93> (дата обращения: 15.05.2023).

<sup>2</sup> Development of the Forecast Propagation Database for NOAA's Short-Term Inundation Forecast for Tsunamis (SIFT) / E. Gica [et al.]. Seattle, WA : Department of Commerce, 2008. 95 p. (NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-139).

ущерб, связанный с остановкой производства в опасных местах, эвакуацией населения, выводом судов в открытое море. Причем всякого рода деятельность в прибрежной полосе останавливается на несколько часов. В силу большого количества ложных тревог суммарный ущерб от них сравним с ущербом от состоявшегося цунами. К настоящему времени количество ложных тревог составляет не менее 75 % от общего числа тревог [10, 11].

Проблема состоит в том, чтобы давать адекватный заблаговременный, дифференцированный по участкам побережья прогноз времени прихода первой и максимальной волн цунами в заданный пункт и их амплитуд, а также длительности тревожного режима. Прогноз должен обеспечивать своевременную эвакуацию населения только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную угрозу [6]. Именно эти характеристики цунами перечислены в определении прогноза цунами, сформулированном Межправительственной океанографической комиссией<sup>3</sup> (МОК) ЮНЕСКО в 2013 г. На основании магнитудно-географического критерия такой детальный прогноз невозможен [7].

В настоящее время эффективным методом прогноза является способ, основанный на использовании данных о цунами глубоководных станций системы *DART* (*Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis* – мониторинг и предупреждение о цунами в океане)<sup>4</sup>. Метод инверсии данных ближайших к очагу цунами станций *DART* позволяет реконструировать источник цунами и заблаговременно рассчитывать волновые формы цунами в заданных точках в океане или вблизи побережья.

Такие способы развиваются с конца 80-х гг. [12]. Позднее [3, 4] развитие идеи привело к созданию гидрофизического способа прогноза *NOAA* (*National Oceanic and Atmospheric Administration* – Национальное управление океанических и атмосферных исследований), или *SIFT*<sup>2,4</sup> (*Short-term Inundation Forecasting for Tsunamis* – краткосрочный прогноз затопления при цунами) [5, 13]. По данным о цунами в океане выполняется расчет волновых форм в заданных точках в океане или вблизи побережья на основе заранее созданной базы синтетических мареограмм объемом в десятки терабайт. Способ *NOAA* с успехом применялся при расчете всех значительных цунами в Тихом океане с 1996 г., в том числе в оперативном режиме. Развитие сети наблюдений за уровнем в океане и вблизи побережья стимулировало ряд работ по совершенствованию метода инверсии [14–18]. Прогнозы цунами на основе инверсии, способа *NOAA*, соответствуют определению МОК ЮНЕСКО. В настоящее время при возникновении цунамигенного землетрясения расчеты способом *NOAA* (*SIFT*) выполняются для северо-западного побережья США, побережья Аляски и Алеутских островов. Для прогнозирования цунами необходима заранее рассчитанная база синтетических мареограмм, охватывающая области потенциальных очагов цунами и области, для которых выполняется прогноз. В противном случае этот метод не применим.

---

<sup>3</sup> Tsunami Glossary / Intergovernmental Oceanographic Commission. Fourth Edition. Paris : UNESCO, 2019. P. 35–36. (IOC Technical Series ; 85). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188226> (дата обращения: 15.05.2023).

<sup>4</sup> NOAA Center for Tsunami Research. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/> (дата обращения: 15.05.2023).

В работах [19, 20] предложен метод ассимиляции данных, сочетающий наблюдения и численное моделирование, не требующий информации об источнике цунами. Он дает возможность прогнозирования цунами в дальней зоне по данным ближайших к очагу станций *DART*.

Для побережья российского Дальнего Востока опасность представляют не только локальные цунами с эпицентрами на северо-западе Тихого океана от Камчатки до Японии, но и трансокеанские цунами, возникающие у побережья Южной Америки. Чилийское цунами 1960 г. вследствие землетрясения с магнитудой 9,5 вызвало заплески высотой до 7 м на побережьях Камчатки и Курильских островов<sup>5</sup>. Во время события 27.02.2010 после землетрясения с магнитудой 8,8 у побережья Чили тревога цунами объявлялась на Курильских островах, произведена эвакуация населения. К счастью, уже после отмены тревоги максимальные волны с амплитудой около 1 м, пришедшие спустя 4 ч после первой, не причинили ущерба [21, 22].

Российская служба предупреждения о цунами не имеет возможности давать адекватный детальный прогноз цунами на побережье Дальнего Востока в силу отсутствия современных действующих способов прогноза. Для расчета локальных или трансокеанских цунами на Дальнем Востоке способ *NOAA (SIFT)* не применим ввиду отсутствия соответствующей базы синтетических мареограмм.

Краткосрочный прогноз по данным о цунами в океане может выполняться с использованием оригинального экспресс-метода оперативного прогноза цунами [6], основанного на фундаментальном принципе взаимности. Для выполнения прогноза требуется сейсмологическая информация только о времени начала и координатах эпицентра землетрясения и информация о цунами, получаемая в океане одной станцией измерения уровня.

Способ применялся для моделирования курильских цунами 2006, 2007 и 2009 гг. в океане по данным станций системы *DART* в различных направлениях от очагов [6]. Возможности способа оперативного прогноза для дальневосточного побережья России на примере локального курильского цунами 2020 г. в режиме, близком к режиму реального времени, представлены в [8].

Землетрясения 2007–2015 гг. у западного побережья Южной Америки и последовавшие за ними цунами ожидаемо вызвали большой интерес исследователей. Использование данных об этих цунами предоставляет хорошую возможность проверить на фактическом материале справедливость различных моделей прямого расчета и оперативного прогноза цунами. Работы, посвященные конкретным событиям 2007–2015 гг., рассмотрены ниже. В них использованы идеи, положенные в основу способа *NOAA*. Другие исследования, кроме работ автора, в которых использовались бы идеи применяемого в настоящей статье экспресс-метода, не известны.

Целью работы является изучение возможности оперативного прогнозирования цунами, моделирование процесса выработки прогноза в условиях реального времени и на основе этого демонстрация возможностей экспресс-метода оперативного прогноза цунами. На примерах трансокеанских перуан-

---

<sup>5</sup> URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search> (дата обращения: 15.05.2023).

ского 2007 г., чилийских 2010, 2014 и 2015 гг. цунами показано, что по ограниченному данным о землетрясении (только координаты эпицентра и время начала землетрясения) и при наличии информации глубоководных станций измерения уровня океана возможен оперативный прогноз цунами.

## 2. Экспресс-метод оперативного прогноза цунами

Практическое применение способа (экспресс-метода) оперативного прогноза цунами, описанного в [6], состоит в следующем.

Расчетное соотношение следует из известного фундаментального принципа взаимности, справедливого для волн типа цунами при условии подобия форм источников волн:

$$\zeta(A, s) = \zeta(M, s) \cdot \frac{\eta(A, s)}{\eta(M, s)}.$$

Здесь  $M$  – точка в океане, в которой производится измерение уровня океана;  $A$  – точка в океане или вблизи побережья, для которой выполняется прогноз. Функции  $\zeta(A, s)$  и  $\zeta(M, s)$  относятся к одному цунами, функции  $\eta(M, s)$  и  $\eta(A, s)$  – к другому, форма источника которого подобна форме первого, а эпицентры источников совпадают.

Все функции, входящие в расчетную формулу, являются образами интегрального преобразования Лапласа ( $s$  – параметр преобразования Лапласа).

Это соотношение позволяет по данным об уровне океана в точке  $M$  (функция  $\zeta(M, s)$ ) с помощью передаточной функции (отношение в правой части равенства) рассчитывать форму ожидаемого цунами (функция  $\zeta(A, s)$ ) в любой точке  $A$  побережья.

В оперативном режиме в считанные минуты достоверно определяются координаты эпицентра землетрясения. При определении магнитуды землетрясения возможны ошибки, нередко значительные [23]. Другая информация о механизме землетрясения зачастую отсутствует. Поэтому делается главное допущение. Расчетное соотношение приближенно справедливо, если передаточная функция строится с помощью вспомогательного решения задачи о распространении волн от начального возвышения свободной поверхности. Начальное возмущение представляет собой круговое возвышение свободной поверхности с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения.

Поскольку прогноз выполняется с использованием данных о сформировавшемся цунами в океане, механизм землетрясения не играет роли. В этих данных неявно содержится информация о процессе возбуждения цунами, включающая влияние дополнительных факторов, например подводных оползней. Возможные ошибки в определении магнитуды землетрясения не сказываются на результате прогноза, поскольку в расчетах эта характеристика не используется.

Передаточная функция строится в режиме реального времени после получения информации о координатах эпицентра землетрясения. Для ее построения выполняется расчет функций  $\eta(M, s)$  и  $\eta(A, s)$  (волновых форм в точках  $M$  и  $A$ ) от вспомогательного источника <sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Королев Ю. П. Оперативный прогноз цунами в Тихом океане // Геосистемы переходных зон. 2017. Т. 1, № 2. С. 3–17. EDN ZBAFJJ.

Обратное численное преобразование Лапласа завершает решение задачи. Результатом является форма ожидаемой волны в заданной точке  $A$ .

### 3. Постановка численного эксперимента

Для каждого события выполнялся расчет уровня океана в заданных точках нахождения станций системы *DART* от вспомогательного аксиально-симметричного источника. Во всех численных экспериментах центр источника совпадал с эпицентром землетрясения, диаметр источника был равен 100 км, а максимальная амплитуда 10 м. Передаточные функции строились для каждой заданной точки прогноза в соответствии с расчетным соотношением. Для соблюдения условий оперативного режима в численных экспериментах длительности записей станций, по которым выполнялся прогноз, выбирались равными длительности первого полупериода (первого периода) цунами на соответствующей станции. Оперативность прогнозирования оценивалась для ближней (время пробега цунами менее 4 ч) и дальней зон (пробег более 4 ч).

Для подтверждения работоспособности примененного способа производилось сравнение расчетных волновых форм с зарегистрированными на станциях *DART* в океане <sup>7, 8</sup>. В силу приближенного характера экспресс-метода полученный результат не предполагает идеального совпадения с волновой формой реального цунами. В настоящей работе за критерий адекватности прогноза принимается ответ на вопрос: возможно ли по результатам расчетов оценить степень опасности цунами, чтобы принять решение об объявлении тревоги службами предупреждения.

В задачи работы не входили расчеты цунами вблизи побережий.

### 4. Результаты

Расчетная схема численных экспериментов приведена на рис. 1, на котором указаны положения станций системы *DART*, эпицентры землетрясений. При моделировании распространения цунами в Тихом океане использовалась глобальная батиметрия [24, 25]. Расчеты выполнялись в сферических координатах на разностной сетке с шагом 5 км на широте экватора.

Информация станций системы *DART* об уровне океана взята с сайта <sup>7</sup>.

#### 4.1. Перуанское цунами 2007 г.

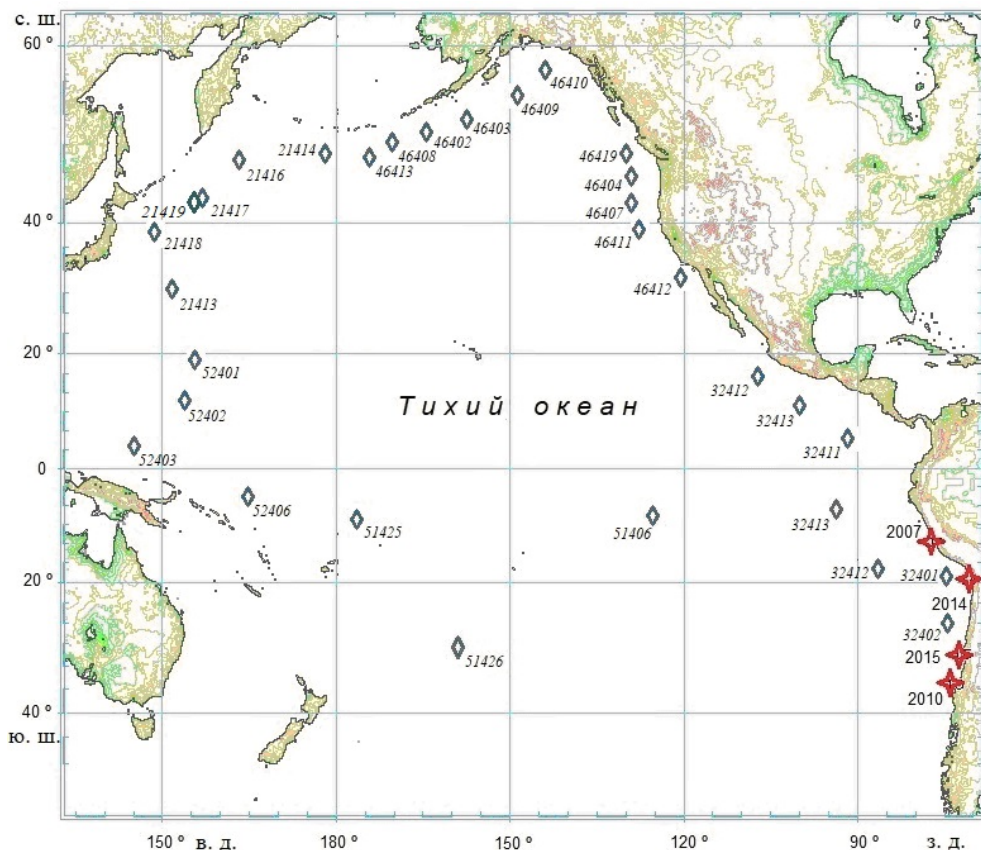
Землетрясение (магнитудой  $M 8,0$ ) с эпицентром в точке с координатами  $13^{\circ}23'10''$  ю. ш.,  $76^{\circ}36'11''$  з. д. произошло у побережья Перу 15 августа 2007 г. в  $23:40:58$  UTC. Возникшее цунами <sup>5</sup> вызвало затопление ближайшего к очагу участка побережья высотой до 10 м.

Ближайшей к очагу станцией, зарегистрировавшей цунами, являлась станция *DART 32401*, расположенная к югу от эпицентра землетрясения <sup>7</sup> (рис. 1).

---

<sup>7</sup> National Data Buoy Center : site. URL: [https://ndbc.noaa.gov/to\\_station.shtml](https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml) (дата обращения: 18.05.2023).

<sup>8</sup> URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/recenttsunamis-table.shtml> (дата обращения: 15.05.2023).



**Р и с. 1.** Станции системы *DART* (ромбы) и эпицентры землетрясений (красные четырехконечные звезды) в Тихом океане  
**Fig. 1.** Location of the *DART* stations (diamonds) and earthquake epicenters (red four-pointed stars) in the Pacific Ocean

Применительно к событию 2007 г. в работе [26] исследовано влияние характеристик источника на расчетные амплитуды цунами. Выполнялась реконструкция очага по поверхностным и объемным сейсмическим волнам, а также по данным о цунами станции *DART* 32401 с использованием синтетических мареограмм. В работе [27] по данным станции *DART* 32401 с использованием синтетических мареограмм выполнен расчет цунами 2007 г. для точек в океане и вблизи населенных пунктов. Результаты экспериментального прогноза в режиме реального времени цунами показали, что примененный способ *NOAA* может с успехом применяться в оперативном режиме. Получено хорошее соответствие расчетных и фактических данных как в океане, так и на прибрежных мареографах.

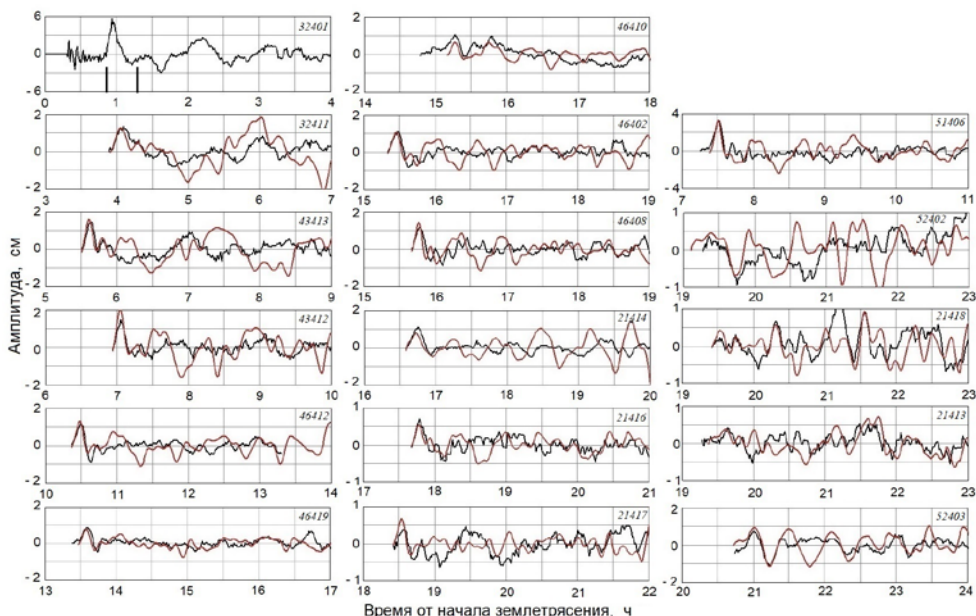
В настоящей работе для расчета цунами в океане использовались данные станции *DART* 32401 длительностью 30 мин (первый период волны) с 51-й до 81-й мин после землетрясения (участок, выделенный черными линиями на рис. 2, слева сверху).

Представленные результаты демонстрируют достаточно хорошее совпадение с данными регистрации. Качество расчетов позволяет адекватно оце-



нить степень опасности ожидаемого цунами. Оно сопоставимо с качеством расчетов, полученных в работах [26, 27] и на сайте NOAA <sup>4</sup>.

Хорошее совпадение расчетных и зарегистрированных волновых форм наблюдается как в дальней (пробег волны более 4 ч), так и в ближней (пробег менее 4 ч) зоне. В событии 2007 г., так же, как и в последующих, излучение энергии из очага неізотропно <sup>4</sup>. Применение экспресс-метода прогноза цунами, использующего круговой источник для построения передаточных функций, дает вполне адекватный результат как в дальней, так и в ближней зоне, независимо от направления от очага.



**Р и с. 2.** Волновые формы перуанского цунами 2007 г.: зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по данным станции *DART 32401* для станций *DART*, находящихся к северу от очага цунами и вдоль Западного побережья США (слева), вдоль Алеутских островов до Камчатки (посередине), к западу от эпицентра землетрясения (справа). Здесь и в последующих рисунках на каждом графике справа сверху указан номер станции *DART*

**Fig. 2.** Waveforms of the 2007 Peruvian tsunamis: the recorded (black line) and computed (red line) ones based on the *DART 32401* data for the *DART* stations located north of the tsunami source, along the US West Coast (left), along the Aleutian Islands up to Kamchatka (middle) and to the west of the earthquake epicenter (right). Here and in the following figures, the *DART* station number is shown at the top right of each graph

Построение передаточных функций (расчет волновых форм от вспомогательного кругового источника) может начинаться после получения информации о времени начала и координатах эпицентра землетрясения.

Прогноз в ближней зоне может быть дан сразу после получения информации о прохождении первого периода цунами через станцию *DART 32401*, т. е. через 81 мин после землетрясения, в дальней – по мере построения передаточной функции, но не позднее 1,5–2 ч после начала вспомогательных расчетов.

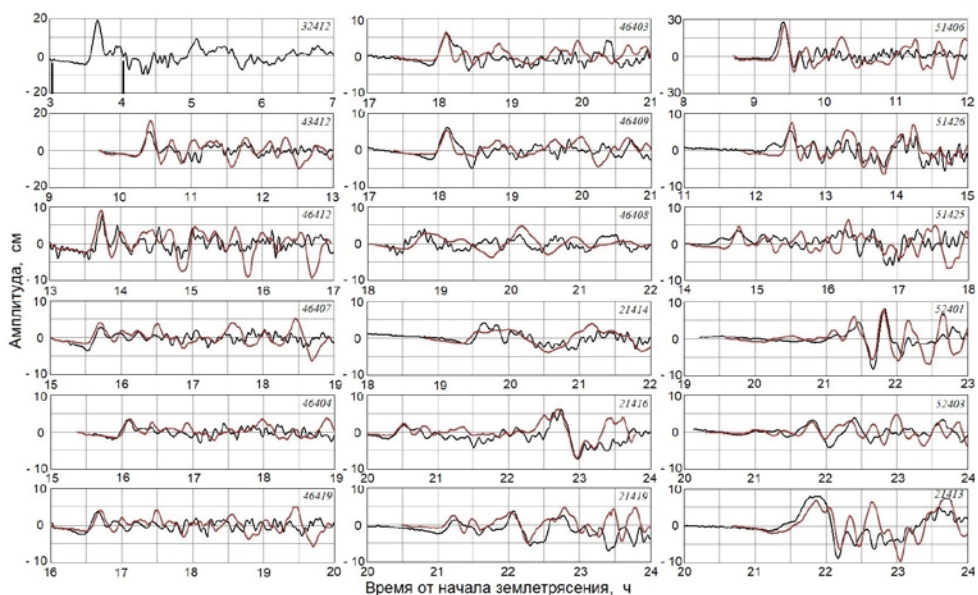
#### 4.2. Чилийское цунами 2010 г.

27 февраля 2010 г. в 06:34:12 UTC у побережья Чили произошло землетрясение (M 8,8) с эпицентром в точке с координатами 36°07'19" ю. ш., 72°53'53" з. д. (см. рис. 1). Возникшее цунами<sup>5</sup> вызвало затопление ближайших к очагу участков побережья Чили высотой до 29 м.

Расчеты цунами 2010 г. в работе [28] выполнены на основе начальных возмущений в очаге цунами, реконструированных по данным станций DART, другим данным. Показано, что возможен прогноз цунами в реальном времени у побережья Японии по данным станций DART, ближайших к очагам у побережья Чили.

В настоящей работе расчет этого цунами выполнялся по данным записи станции DART 32412<sup>7</sup>, находящейся к северо-западу от очага (см. рис. 1), длительностью 62 мин, со 180-й до 242-й минуты после землетрясения (рис. 3, *слева сверху*). Форма цунами на этой станции характеризуется начальной отрицательной фазой.

Результаты расчета представлены на рис. 3. Как и в предыдущем случае, расчетные волновые формы хорошо совпадают с зарегистрированными станциями DART<sup>7</sup>.



**Р и с. 3.** Волновые формы Чилийского цунами 2010 г.: зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по данным станции DART 32412 для станций DART, находящихся к северу от очага цунами и вдоль Западного побережья США (*слева*), вдоль Алеутских островов до Курильских островов (*посередине*), к западу от эпицентра землетрясения (*справа*)

**Fig. 3.** Waveforms of the 2010 Chilean tsunami: the recorded (black line) and computed (red line) ones based on the DART 32412 data for the DART stations located north of the tsunami source, along the US West Coast (*left*), along the Aleutian Islands up to the Kuril Islands (*middle*) and to the west of the earthquake epicenter (*right*)

Расчетные волновые формы в большинстве случаев показывают вступление цунами, начинающееся с понижения уровня океана в соответствии с формой волны на станции *DART 32412*. Качество расчетов позволяет адекватно оценивать степень опасности ожидаемого цунами и сопоставимо с качеством расчетов в [28].

Прогноз может быть дан сразу после получения информации о прохождении первой волны цунами через станцию *DART 32412*, т.е. через 242 мин после землетрясения.

#### 4.3. Чилийское цунами 2014 г.

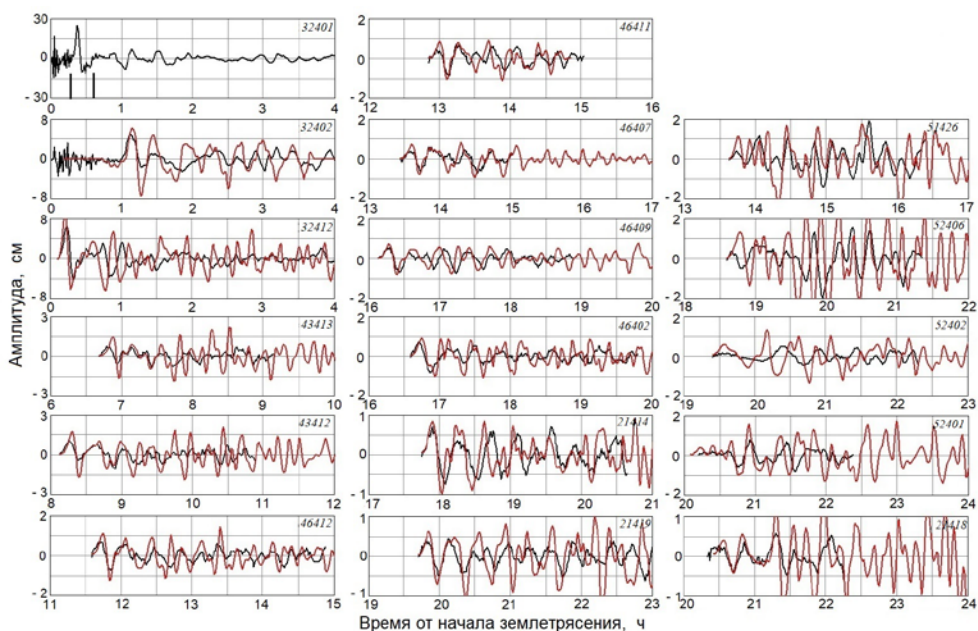
Землетрясение с  $M 8,2$  произошло 1 апреля 2014 г. в 23:46:46 *UTC* у северного побережья Чили с эпицентром в точке с координатами  $19^{\circ}38'31''$  ю. ш.,  $70^{\circ}49'01''$  з. д. (см. рис. 1). На побережье Чили, Эквадора и Коста-Рики была объявлена тревога цунами и эвакуировано население с опасных территорий. Цунами<sup>5</sup> вызвало затопление ближайшего к очагу участка побережья Чили высотой до 4 м.

В работе [29] с использованием данных трех станций *DART* получено распределение подвижки (формы смещения дна) в очаговой зоне. Рассчитаны волновые формы с использованием нелинейных уравнений мелкой воды от этого возмущения. Получено хорошее соответствие расчетных волновых форм с данными мареографов вдоль побережья Чили. Цунами 2014 г. исследовалось также в работах [30, 31]. Для моделирования цунами в качестве источника взят единичный прямоугольный разлом с однородным сдвигом. Получено хорошее соответствие расчетных и зарегистрированных станциями *DART* волновых форм. Возможность использования примененной методики для оперативного прогноза цунами не обсуждалась.

В настоящей работе данные станции *DART 32401*, ближайшей к очагу цунами, находящейся к западу, взяты в качестве опорных (рис. 4, *слева сверху*), на их основе выполнен прогноз. Использовались данные записи станции с 17-й до 36-й минуты от начала землетрясения длительностью 19 мин (первая волна цунами).

Результаты расчетов (ретроспективного прогноза) демонстрируют удовлетворительное совпадение с данными регистрации<sup>7</sup> в направлениях на север от очага, вдоль Западного побережья США, Алеутских островов и вблизи Курильских островов. Качество прогноза сопоставимо с качеством расчетов способом *NOAA (SIFT)* с использованием данных двух станций *DART 32401* и *32402*<sup>4</sup>. В западном направлении прогноз дает завышенные амплитуды волновых форм по сравнению с зарегистрированными<sup>4, 7</sup>.

Прогноз в ближней зоне может даваться сразу после получения информации о прохождении первой волны цунами через станцию *DART 32401*, т.е. через 36 мин после землетрясения, в дальней – по мере построения передаточной функции.



**Р и с. 4.** Волновые формы Чилийского цунами 2014 г.: зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по данным станции *DART 32401* для станций *DART*, находящихся к северу от очага цунами (слева), вдоль Западного побережья США, Алеутских островов до Курильских островов (посередине), к западу от эпицентра землетрясения (справа)

**F i g. 4.** Waveforms of the 2014 Chilean tsunami: the recorded (black line) and computed (red line) ones based on the *DART 32401* data for the *DART* stations located north of the tsunami source (left), along the US West Coast, along the Aleutian Islands up to the Kuril Islands (middle) and to the west of the earthquake epicenter (right)

#### 4.4. Чилийское цунами 2015 г.

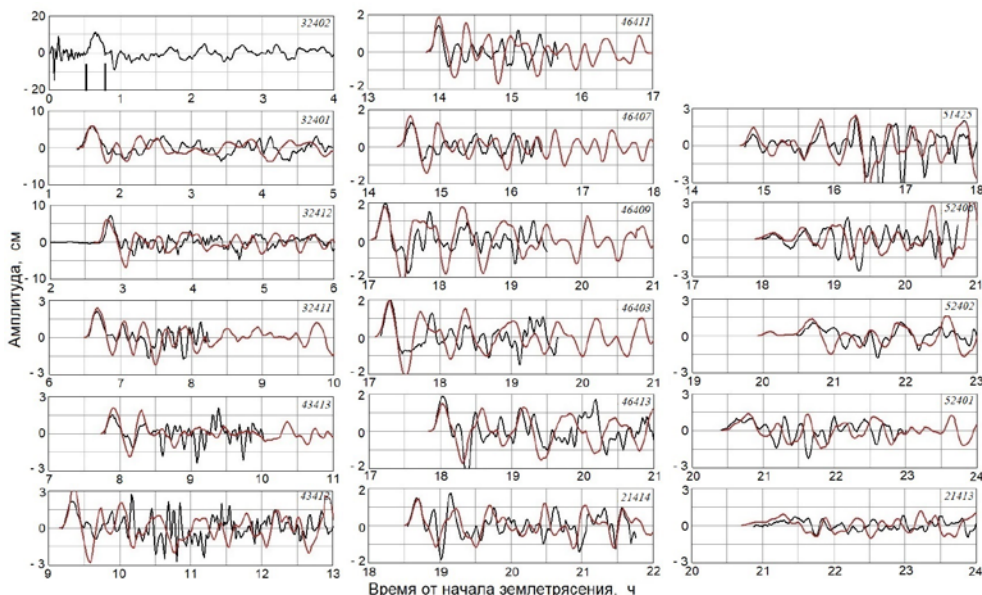
Землетрясение (М 8,3) с эпицентром в точке с координатами 31°34'23" ю. ш., 71°40'26" з. д. вблизи побережья Чили произошло 16 сентября 2015 г. в 22:54:32 UTC. Возникшее цунами<sup>5</sup> вызвало затопление ближайшего к очагу участка побережья высотой до 13,6 м. Возникшее цунами было зарегистрировано множеством станций *DART*. Ближайшей, находящейся к северу от очага, являлась станция *DART 32402*<sup>7</sup> (см. рис. 1).

В работе [20] методом ассимиляции данных ближайших к очагу станций *DART* оценивалась возможность прогнозирования цунами 2015 г. в дальней зоне. Предварительный прогноз мог быть дан через 1 ч после начала землетрясения, т. е. после прохождения первой волны цунами через ближайшую станцию *DART 32402*. В численном эксперименте прогнозируемые формы волн в целом хорошо согласуются с реальными наблюдениями в центральной и восточной частях Тихого океана. Оценки чилийского цунами 2015 г. в режиме реального времени с использованием метода *NOAA (SIFT)* и сравнение их с данными 26 станций *DART*, а также 38 береговых мареографов представлены в [32]. Оценки производились по данным записи ближайшей к очагу станции *DART 32402* длительностью в четверть периода, полупериод и полный период первой волны. Во всех трех случаях наблюдалось хорошее совпадение расчетов и реальных данных в океане и вблизи берега.

В настоящей работе расчет выполнялся по данным записи станции *DART* 32402 длительностью 16 мин (первый полупериод волны) с 31-й до 47-й минуты после землетрясения (рис. 5, слева сверху).

Результаты расчета представлены на рис. 5. Они демонстрируют достаточно хорошее совпадение с данными регистрации<sup>7</sup>. Качество расчетов сопоставимо с качеством расчетов, представленных в работах [20, 32] и на сайте<sup>4</sup>.

Прогноз для станций ближней зоны может быть дан через 47 мин после землетрясения, для более удаленных – по мере выполнения вспомогательных расчетов.



**Р и с. 5.** Волновые формы Чилийского цунами 2015 г.: зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по данным станции *DART* 32402 для станций *DART*, находящихся к северу от очага цунами (слева), вдоль Западного побережья США, Алеутских островов до Камчатки (посередине), к западу от эпицентра землетрясения (справа)

**F i g. 5.** Waveforms of the 2015 Chilean tsunamis: the recorded (black line) and computed (red line) ones based on the *DART* 32402 data for the *DART* stations located north of the tsunami source (left), along the US West Coast, along the Aleutian Islands to Kamchatka (middle) and to the west of the earthquake epicenter (right)

## 5. Обсуждение

Моделирование процесса оперативного прогнозирования цунами заключалось в выполнении расчетов в режиме, близком к режиму реального времени. Построение передаточных функций (расчет волновых форм от вспомогательного кругового источника) начиналось после получения информации о времени начала и координатах эпицентра землетрясения (через 10 мин после начала землетрясения).

Процесс расчета на ноутбуке *Intel Core i5-2450M CPU @ 2,50GHz* на разностной сетке с шагом 5 км в Тихом океане до наиболее удаленных от очага точек с пробегом цунами более 20 ч занимал около 1,5 ч. Построение передаточной функции, индивидуальной для каждого пункта, может осуществлять-

ся в процессе расчета волновых форм. Для ближней зоны (при времени пробега цунами менее 4 ч) прогноз может быть выполнен сразу после получения информации о регистрации первого полупериода (первого периода) цунами ближайшей к очагу станцией *DART*. Длительность волновой формы вспомогательного решения для заданного пункта должна быть равна требуемой длительности прогнозируемой волны. Для дальней зоны прогноз дается по мере выполнения вспомогательных расчетов. Время выполнения прогноза в точках в океане для исследованных цунами приведены в п. 4.1–4.4.

Весь процесс выработки прогноза состоит из последовательного применения трех программ, что не позволяет применять экспресс-метод во время события.

Применение технологий быстрого счета [33] и методики вложенных сектов для построения передаточных функций позволит давать прогноз для любого заданного пункта вблизи побережья сразу после получения информации о прохождении первой волны (первого полупериода) цунами, как трансокеанских, так и локальных, через ближайшую к очагу станцию *DART*.

Во всех рассмотренных событиях излучение энергии из очагов не изотропно<sup>4</sup>. Тем не менее, несмотря на приближенный характер (использование кругового источника волн во вспомогательной задаче для построения передаточной функции), экспресс-метод дает вполне адекватный результат во всех направлениях от очага цунами. Он позволяет с достаточной для практического применения точностью оперативно оценивать степень опасности цунами в заданных точках. Расчетные волновые формы, как правило, хорошо совпадают с зарегистрированными формами цунами станциями системы *DART* во всех направлениях от очага. Результаты демонстрируют достаточно хорошее совпадение с данными регистрации. Качество расчетов сопоставимо с качеством расчетов других авторов.

## 6. Заключение

Выполнено моделирование процесса оперативного прогноза перуанского 2007 г., чилийских 2010, 2014 и 2015 гг. цунами по данным о цунами ближайших к очагу станций системы *DART* с помощью экспресс-метода краткосрочного прогноза цунами. Экспресс-метод заключается в расчете передаточных функций, с помощью которых по данным об уровне океана станций *DART* выполняется прогноз цунами в заданных точках. Передаточные функции строятся на основе результатов расчета волновых форм от вспомогательного аксиально-симметричного начального возвышения свободной поверхности с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения. Использование волновых форм от вспомогательного кругового источника без каких-либо предположений о структуре и механизме землетрясения вполне оправданно в условиях оперативного режима для случаев локальных цунами.

Экспресс-метод, в отличие от других, не нуждается в построении сейсмического источника, не требует гигантской базы синтетических мареограмм. Для выполнения прогноза от сейсмической подсистемы требуется только время начала и координаты эпицентра землетрясения, от гидрофизической – данные одной станции измерения уровня океана, получаемые в режиме реального времени.

Экспресс-метод полностью удовлетворяет определению прогноза цунами, сформулированному МОК ЮНЕСКО.

Экспресс-метод может применяться для прогноза цунами в тех областях, для которых другие способы не применимы (например, отсутствуют базы синтетических мареограмм). Такими областями являются побережья северо-западной части Тихого океана.

Создание комплекса краткосрочного прогноза цунами на основе экспресс-метода позволит повысить качество прогноза, уменьшив количество ложных тревог.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опыт модернизации российской системы предупреждения о цунами / А. В. Фролов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 5–21. EDN OYKXF.
2. *Whitmore P. M., Sokolowski T. J.* Predicting tsunami amplitudes along the North American coast from tsunamis generated in the Northwest Pacific Ocean during tsunami warnings // *Science of Tsunami Hazards*. 1996. Vol. 14, no. 3. P. 147–166. URL: <http://tsunamisociety.org/STHVVol14N3Y1996.pdf> (дата обращения: 15.05.2023).
3. Inverse algorithm for tsunami forecasts / Y. Wei [et al.] // *Journal of Waterway, Ports, Coastal, and Ocean Engineering*. 2003. Vol. 129, iss. 2. P. 60–69. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-950x\(2003\)129:2\(60\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-950x(2003)129:2(60))
4. Real-time tsunami forecasting: Challenges and solutions / F. I. Gonzalez [et al.] // Математические методы в геофизике : Труды Международной конференции. В 2 частях. Новосибирск : ИВМиМГ СО РАН, 2003. Ч. I. С. 225–228.
5. Extraction of tsunami source coefficients via inversion of DART<sup>®</sup> buoy data / D. B. Percival [et al.] // *Natural Hazards*. 2011. Vol. 58, iss. 1. P. 567–590. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9688-1>
6. *Korolev Yu. P.* An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 11, iss. 11. P. 3081–3091. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3081-2011>
7. *Королев Ю. П.* О возможности оперативного прогноза локальных цунами на Курильских островах // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 14–20. EDN ZFISBQ. doi:10.7868/S2073667319040026
8. *Королев Ю. П., Королев П. Ю.* Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения // *Геосистемы переходных зон*. 2020. Т. 4, № 4. С. 447–473. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473>
9. *Гусяков В. К.* Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57, № 9. С. 1601–1615. <https://doi.org/10.15372/GiG20160901>
10. *Gusiakov V. K.* Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168, iss. 11. P. 2033–2041. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0286-2>
11. *Королев Ю. П., Лоскутов А. В.* О достоверном оперативном прогнозе цунами // *Проблемы анализа риска*. 2018. Т. 15, № 1. С. 26–33. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-1-26-33>
12. *Satake K.* Inversion of tsunami waveforms for the estimation of a fault heterogeneity: method and numerical experiments // *Journal of Physics of the Earth*. 1987. Vol. 35, iss. 3. P. 241–254. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.35.241>
13. *Titov V. V.* *Tsunami forecasting* // *Tsunamis*. Cambridge, MA ; London, England : Harvard University Press, 2009. P. 367–396. (The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas ; vol. 15).

14. A methodology for near-field tsunami inundation forecasting: Application to the 2011 Tohoku tsunami / A. R. Gusman [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2014. Vol. 119, iss. 11. P. 8186–8206. <https://doi.org/10.1002/2014JB010958>
15. Time Reversal Imaging of the Tsunami Source / M. J. Hossen [et al.] // *Pure and Applied Geophysics*. 2015. Vol. 172, iss. 3–4. P. 969–984. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1014-5>
16. *Mulia I. E., Asano T.* Initial tsunami source estimation by inversion with an intelligent selection of model parameters and time delays // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. Vol. 121, iss. 1. P. 441–456. <https://doi.org/10.1002/2015JC010877>
17. *Mulia I. E., Gusman A. R., Satake K.* Optimal design for placements of tsunami observing systems to accurately characterize the inducing earthquake // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, iss. 24. P. 12106–12115. <https://doi.org/10.1002/2017GL075791>
18. Sea surface network optimization for tsunami forecasting in the near field: application to the 2015 Illapel earthquake / P. Navarete [et al.] // *Geophysical Journal International*. 2020. Vol. 221, iss. 3. P. 1640–1650. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa098>
19. Tsunami data assimilation without a dense observation network / Y. Wang [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46, iss. 4. P. 2045–2053. <https://doi.org/10.1029/2018GL080930>
20. Far-field tsunami data assimilation for the 2015 Illapel earthquake / Y. Wang [et al.] // *Geophysical Journal International*. 2019. Vol. 219, iss. 1. P. 514–521. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz309>
21. Новые данные о проявлениях цунами на тихоокеанском побережье России по инструментальным измерениям 2009–2010 гг. / Г. В. Шевченко [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 438, № 6. С. 823–828. EDN NXQPHF.
22. *Королев Ю. П., Храмушин В. Н.* Об оперативном прогнозе цунами 1 апреля 2014 г. вблизи побережья Курильских островов // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 4. С. 86–93. EDN VSZHUD.
23. *Okal E. A.* The quest for wisdom: lessons from 17 tsunamis, 2004–2014 // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. Vol. 373, iss. 2053. 20140370. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0370>
24. *Smith W. H. F., Sandwell D. T.* Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1994. Vol. 99, iss. B11. P. 21803–21824. <https://doi.org/10.1029/94JB00988>
25. *Smith W. H. F., Sandwell D. T.* Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // *Science*. 1997. Vol. 277, iss. 5334. P. 1956–1962. [doi:10.1126/science.277.5334.1956](https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1956)
26. The 15 August 2007 Peru Earthquake and Tsunami: Influence of the Source Characteristics on the Tsunami Heights / H. Hébert [et al.] // *Pure and Applied Geophysics*. 2009. Vol. 166, iss. 1–2. P. 211–232. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0439-0>
27. Real-time experimental forecast of the Peruvian tsunami of August 2007 for U.S. coastlines / Y. Wei [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35, iss. 4. L04609. <https://doi.org/10.1029/2007GL032250>
28. Source estimate and tsunami forecast from far-field deep-ocean tsunami waveforms – The 27 February 2010  $M_w$  8.8 Maule earthquake / M. Yoshimoto [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43, iss. 2. P. 659–665. <https://doi.org/10.1002/2015GL067181>
29. *An C., Sepúlveda I., Liu P. L.-F.* Tsunami source and its validation of the 2014 Iquique, Chile, Earthquake // *Geophysical Research Letters*. 2014. Vol. 41, iss. 11. P. 3988–3994. <https://doi.org/10.1002/2014GL060567>
30. Fault slip distribution of the 2014 Iquique, Chile, earthquake estimated from ocean-wide tsunami waveforms and GPS data / A. R. Gusman [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42, iss. 4. P. 1053–1060. <https://doi.org/10.1002/2014GL062604>
31. Deep-Water Characteristics of the Trans-Pacific Tsunami from the 1 April 2014  $M_w$  8.2 Iquique, Chile Earthquake / M. Heidarzadeh [et al.] // *Pure and Applied Geophysics*. 2015. Vol. 172, iss. 3–4. P. 719–730. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0983-8>



32. Real-Time Assessment of the 16 September 2015 Chile Tsunami and Implications for Near-Field Forecast / L. Tang [et al.] // The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami. Cham : Birkhäuser, 2017. P. 267–285. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-57822-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57822-4_19)
33. Fast evaluation of tsunami waves heights around Kamchatka and Kuril Islands // M. Lavrentiev [et al.] // Science of Tsunami Hazards. 2019. Vol. 38, no. 1. P. 1–13. URL: <http://www.tsunamisociety.org/STHV0138N1Y2019.pdf> (дата обращения 25.05.2022).

*Об авторе:*

**Королёв Юрий Павлович**, ведущий научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693022, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16), кандидат физико-математических наук, доцент, **ORCID 0000-0002-7068-7341**, Yu\_P\_K@mail.ru