

УДК 504.4

© А. И. Зайцев^{1*}, Е. Н. Пелиновский^{2,3}, 2023

¹Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. А.М. Горького, д. 25.

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12.

*aizaytsev@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТ ВОЛН ЦУНАМИ ВДОЛЬ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ОСТРОВА САХАЛИН

Статья поступила в редакцию 14.03.2023, после доработки 11.06.2023, принята в печать 30.08.2023

Аннотация

Изучаются функции распределения высот волн цунами вдоль восточного побережья острова Сахалин от источников, расположенных вдоль Курильских островов. Приводятся известные сведения о цунами на Сахалине. Многие из них моделировались численно, что позволяло оценить опасность волн цунами. В настоящей работе сделан упор на функциях распределения высот волн цунами, которые ранее вообще не рассчитывались для этого региона. С этой целью выполнены расчеты распространения волн цунами от гипотетических сильных землетрясений с $M = 8,2$, расположенных в районах Северных, Средних и Южных Курильских островов. Эти расчеты проведены с помощью вычислительного кода НАМИ-ДАНС, решающего нелинейные уравнения мелкой воды с использованием вложенных сеток с минимальным шагом около 9 м. Не имея достоверной прибрежной топографии, моделирование было выполнено до глубины около 3 м. Результаты расчетов подтвердили, что рассчитанные функции распределения высот волн цунами вдоль восточного побережья Сахалина хорошо аппроксимируются логнормальной функцией. Параметры этих распределений зависят от местоположения очага даже при одинаковых параметрах землетрясения, что лишний раз подчеркивает существенную роль батиметрии морского дна на характеристики цунами на берегу.

Ключевые слова: Цунами, численное моделирование, логнормально распределение, Охотское море

© А. И. Зайцев^{1*}, Е. Н. Пелиновский^{2,3}, 2023

¹Special Design Bureau for Marine Research Automation of RAS Far Eastern Branch, 693023, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation, Str. A.M. Gor'kogo, 25, Russia

²Institute of Applied Physics RAS, 603950, Nizhny Novgorod, Box-120, Ulyanova Street, 46, Russia

³National Research University — Higher School of Economics, 603155 Nizhny Novgorod, Str. Bolshaya Pecherskaya, 25/12, Russia

*aizaytsev@mail.ru

MODELING OF TSUNAMI WAVE HEIGHT DISTRIBUTION FUNCTIONS ALONG THE EAST COAST OF SAKHALIN ISLAND

Received 14.03.2023, Revised 11.06.2023, Accepted 30.08.2023

Abstract

The functions of the distribution of tsunami wave heights along the eastern coast of Sakhalin Island from sources located along the Kuril Islands are being studied. Known information about the tsunami on Sakhalin is given. Many of them were modeled numerically, which made it possible to assess the hazard of tsunami waves. The present work focuses on the functions of distributing the heights of tsunami waves, which were not previously calculated for this region at all. To this case, calculations were made of the propagation of tsunami waves from hypothetical strong earthquakes with $M = 8.2$ located in the regions of the Northern, Middle and Southern Kuril Islands. These calculations were carried out using the NAMI-DANCE computational code, which solves

Ссылка для цитирования: Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н. Моделирование функций распределения высот волн цунами вдоль восточного побережья острова Сахалин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 3. С. 62–71. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-5

For citation: Zaytsev A.I., Pelinovsky E.N. Modeling of Tsunami Wave Height Distribution Functions along the East Coast of Sakhalin Island. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 3, 62–71. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-5

non-linear shallow water equations using nested grids with a minimum grid is about 9 m. Having no reliable coastal topography, the modeling was carried out to a depth of about 3 m. The results of the calculations confirmed that the calculated functions of the distribution of tsunami wave heights along the eastern coast of Sakhalin are well approximated by the lognormal function. The parameters of these distributions depend on the location of the source even with the same earthquake parameters, which once again emphasizes the significant role of seabed bathymetry on the characteristics of a tsunami on the shore.

Keywords: Tsunami, numerical modeling, lognormal distribution, Sea of Okhotsk

1. Введение

В последнее время проводится активная работа по цунамирайонированию побережья России. Ранее известная детерминированная карта цунами опасности Тихоокеанского побережья России [1] сейчас дополнена вероятностными оценками [2, 3], и она может использоваться для практических оценок высот цунами в различных точках побережья. В частности, такого рода оценки входят в разработанный официальный документ СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», утвержденный Министерством строительства Российской Федерации.

Важное место для анализа распределения высот волн цунами вдоль побережья отводится аппроксимациям функций распределения: см., например, недавние обзоры [4, 5], которые позволяют оценить соотношение между большими и малыми значениями высот волн, предсказать вероятность аномально больших заплесков, а также дать усредненные характеристики явления. Особо отметим здесь известное определение магнитуды цунами, для которого необходимо знать среднюю высоту цунами на определенном участке побережья [6]. Разумеется, для аппроксимации данных могут использоваться различные распределения (Гаусса, Вейбула, Порето и др.), однако наибольшую популярность получило логнормальное распределение, предложенное еще в работах Ван Дорна [7] и Каджиуры [8]. Оно выводится строго с помощью центральной предельной теоремы, учитывая случайный характер донной батиметрии и изрезанной береговой линии в предположении их статистической однородности и линейной теории волн [9–11]. В частности, отметим хорошую пригодность логнормального распределения для описания катастрофических цунами этого тысячелетия: 2004 года в Индийском океане [12], 2011 года в Японии [13] и 2018 года на острове Сулавеси [5].

Настоящая работа посвящена анализу функций распределения высот волн цунами вдоль восточного побережья острова Сахалин, получаемых в результате расчетов динамики волн от источников, расположенных около Курильских островов. Сразу заметим, что исторические данные о цунами на Сахалине собраны в различных каталогах [14–18] и в разделе 2 кратко воспроизводятся. Многие из реальных событий моделировались численно, что позволяло уточнить очаги цунами и исследовать цунами опасность различных участков побережья [1–3]. Между тем функции распределения высот волн вдоль побережья Сахалина фактически еще не изучались. В настоящей работе для выяснения общих свойств функций распределения мы решили не использовать результаты расчетов конкретных событий, а рассчитать несколько модельных событий, помещая очаги принципиально в разные части Курильских островов. Используемая математическая модель описана в разделе 3. Результаты расчетов трех сценариев приведены в разделе 4. Анализ функций распределения выполнен в разделе 5, и он позволил показать, что теоретический логнормальный закон является хорошей аппроксимацией рассчитанных высот вне зависимости от локализации очага цунами в районе Курильских островов. Полученные результаты суммированы в Заключение.

2. Краткая сводка исторических цунами, наблюдавшихся на восточном побережье острова Сахалин

Остров Сахалин, как известно, находится в Охотском море и отделяется от Тихого океана проливами Курильских островов. Тихий океан и сами Курильские острова расположены в зоне сильной сейсмической активности; здесь подводные землетрясения вызывают цунами, в том числе сильные, которые распространяются по Тихому океану. Обзор исторических цунами, зарегистрированных на Дальнем Востоке России, содержится в [14–18]. Тихоокеанские цунами проникают в акваторию Охотского моря достаточно ослабленными в силу экранирующих свойств Курильских островов. С другой стороны, подводные землетрясения происходят и в акваториях Охотского и Японского морей, вызывая цунами, достигающие острова Сахалин.

Большинство цунами, источники которых расположены далеко от Сахалина, проявились на восточном побережье острова. Высоты волн на острове Сахалин от удаленных землетрясений по данным наблюдений составляли 0,1–1,2 м. Цунами, источники которых расположены с тихоокеанской стороны южных

и центральных Курильских островов, в разной степени проявились на всем побережье о-ва Сахалин. Это связано с тем, что волны цунами проникают в Охотское море через разные проливы Курильских островов, что влияет на их высоту, а в Японское море через пролив Лаперуза и частично через проливы Японских островов.

Курильские острова экранируют не только удаленные цунами, эпицентры которых расположены далеко от Тихоокеанского побережья России, но и в случае генерации цунами непосредственно на Курилах. Курильские острова расположены в сейсмически активной зоне и здесь землетрясения часто вызывают цунами. На рис. 1. представлены очаги цунами, расположенные в районе Курильских островов [19]. Уже в этом столетии произошло несколько цунамигенных землетрясений, вызвавших, в частности, Симуширские цунами 2006-го и 2007 годов [19–20] и Северокурильское событие 2020 года [21]. Источники цунами, волны от которых распространились по акватории Охотского моря и проявились на острове Сахалин в основном были сосредоточены с тихоокеанской стороны центральных и южных Курильских островов.

На рис. 2 показаны высоты волн цунами, проявившиеся на побережье Сахалина и Курильских островов, источники которых расположены с тихоокеанской стороны Курильских островов. Цифрам соответствуют цунами: 1–06.11.1958; 2–13.10.1963; 3–20.10.1963; 4–29.01.1968; 5–11.08.1969; 6–10.06.1975; 7–23.03.1978; 8–24.03.1978; 9–04.12.1995; 10–15.11.2006; 11–13.01.2007. Из рис. 2 видно, что наблюдаемые высоты волн цунами (инструментальные данные) и высоты заплесков (наблюдательные данные) различные. Однако основные высоты цунами находятся в пределах 2-х м, так что средняя высота цунами на Курильских островах за рассматриваемый период равна 1,7 м (без учета заплесков 2006 года). С учетом максимальных высот заплесков, приведенных в [22], средние значения высот волн цунами составляют 2,5 м. На о-ве Сахалин средняя высота от цунами, источники которых расположены в районе Курильских островов, составляет всего 0,16 м. Таким образом, согласно данным наблюдений высоты цунами на побережье о-ва Сахалин примерно в 10 раз меньше, чем на побережье Курильских островов, что объясняется экранирующими свойствами Курильских островов.

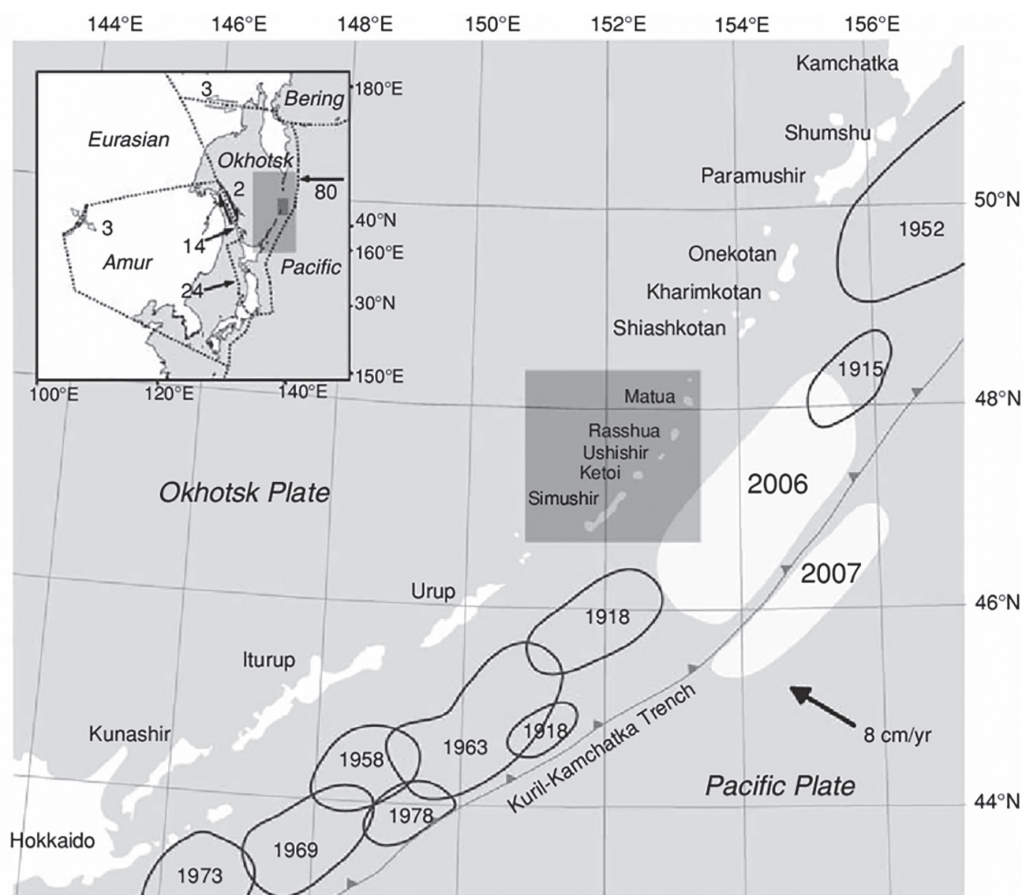
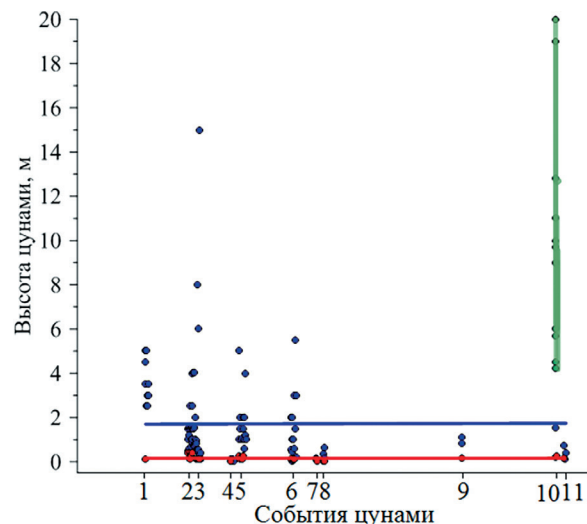


Рис. 1. Карта исторических очагов цунами в Курило-Камчатской зоне [19]

Fig. 1. Map of historical tsunami sources at Kuril-Kamchatka zone [19]

Рис. 2. Высоты волн цунами, проявившиеся на побережье о. Сахалин и Курильских островов от источников, расположенных с тихоокеанской стороны Курильских островов (синие точки — цунами на Курильских островах; красные точки — цунами на Сахалине; зеленые линии — высоты заплесков для побережья Курильских островов от цунами 2006 года [22]; красная линия — среднее значение высот цунами на Сахалине; синяя линия — среднее значение высот цунами на Курильских островах (без учета заплесков цунами 2006 года))

Fig. 2. Tsunami wave heights manifested on the coast of Sakhalin Island and the Kuril Islands from sources located on the Pacific side of the Kuril Islands (blue dots — tsunamis on the Kuril Islands; red dots — tsunamis on Sakhalin; green lines — the height of the patches for the coast of the Kuril Islands from the tsunami of 2006 [22]; red line — average value of tsunami heights on Sakhalin; blue line — the average value of the tsunami heights in the Kuril Islands (excluding the 2006'th tsunami runup))



Наиболее сильное воздействие на побережье о-ва Сахалин оказало цунами, вызванное землетрясением 13 октября 1963 года в районе о. Уруп. Магнитуда землетрясения, спровоцировавшего образование цунами, равна 8,1. Его расположение вблизи крупных проливов Курильской гряды Фриза и Буссоль способствовало большему проникновению волн цунами в Охотское море. В настоящей работе мы фокусируемся именно на такого рода событиях, когда очаги цунами расположены в районе Курильских островов.

3. Математическая модель распространения цунами

Для расчетов распространения волн цунами на большие расстояния необходимо учитывать вращение Земли и ее сферичность. В приближении «шарообразной» Земли нелинейная система уравнений мелкой воды принимает следующий вид:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = fN, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N^2 \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = -fM, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0, \quad (3)$$

где η — смещение водной поверхности, t — время, M и N — компоненты расхода воды вдоль долготы λ и широты θ , f — параметр Кориолиса ($f = 2\Omega \sin \theta$) и Ω — частота вращения Земли (период вращения 24 часа), R — радиус Земли, $D = h(\lambda, \theta) + \eta$ — полная глубина бассейна, где $h(\lambda, \theta)$ — невозмущенная глубина воды, предполагаемая известной и не меняющейся во времени. Гиперболическая система уравнений (1)–(3) записана в полных потоках, обеспечивая выполнение законов сохранения, что наиболее удобно для учета эффектов обрушения волн большой амплитуды.

Эта модель реализована в вычислительном комплексе НАМИ-ДАНС, и она описана в деталях в статьях [23–25].

4. Результаты численных расчетов

Для численного моделирования характеристик цунами в прибрежной зоне нами использована детальная батиметрия прибрежной зоны восточного побережья острова Сахалин. Батиметрия открытой части Охотского моря взята из атласа GEBCO (шаг 0,5 мин). На практике, при расчёте наката волн цунами в реальных акваториях необходимо иметь очень хорошую батиметрию морского дна. Современные цифровые карты батиметрии, например, GEBCO, не обеспечивают адекватное воспроизведение рельефа дна в численных моделях распространения волн, что может приводить к существенным ошибкам при оценке максимальных заплесков цунами на побережье. Поэтому расчеты проводились на вложенных сетках. Самый большой домен включает в себя всю акваторию Охотского моря и Курильские острова, шаг около 1 км. Средний домен содержит восточную часть острова Сахалин, шаг по пространству приблизительно 200 м.

Малый домен имеет шаг около 9 м. Численная модель и шаг цифровой карты позволяют проводить расчеты наката волн на берег. Не имея достоверной прибрежной топографии, моделирование было выполнено до глубины около 3 м.

В качестве источника возможного цунами выбрано гипотетическое землетрясение магнитудой 8,2 в районе центральных Курильских островов с параметрами, близкими к Симуширским землетрясениям 2006 и 2007 года [22]. В наших расчетах использованы следующие параметры землетрясения: глубина фокуса 20 км, длина разрыва 300 км, его ширина 80 км и смещение по разрыву (slip) 9 м, угол разлома с меридианом (strike) -135° , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip) 10° и вдоль разлома (rake) 110° . Мы рассмотрели три различных положения эпицентра землетрясения: 1) на Северных островах (координаты $154,5^\circ$ в.д. $45,42^\circ$ с.ш. $154,5^\circ$ в.д. $45,42^\circ$ с.ш.), 2) на Средних островах (координаты $149,93^\circ$ в.д. $45,27^\circ$ с.ш.), и 3) на Южных островах (координаты $147,5^\circ$ в.д. $43,38^\circ$ с.ш.). Начальное смещение уровня воды в океане рассчитывалось с помощью модели Окада [26].

Распределение высот цунами в Охотском море показано на рис. 3–5 (расчет произведен с учетом стандартного коэффициента шероховатости $n = 0,015 \text{ м}^{-1/3}$ с). Как видно из рисунков, во всех сценариях основной удар волны цунами принимает на себя северо-восточная часть побережья острова Сахалин.

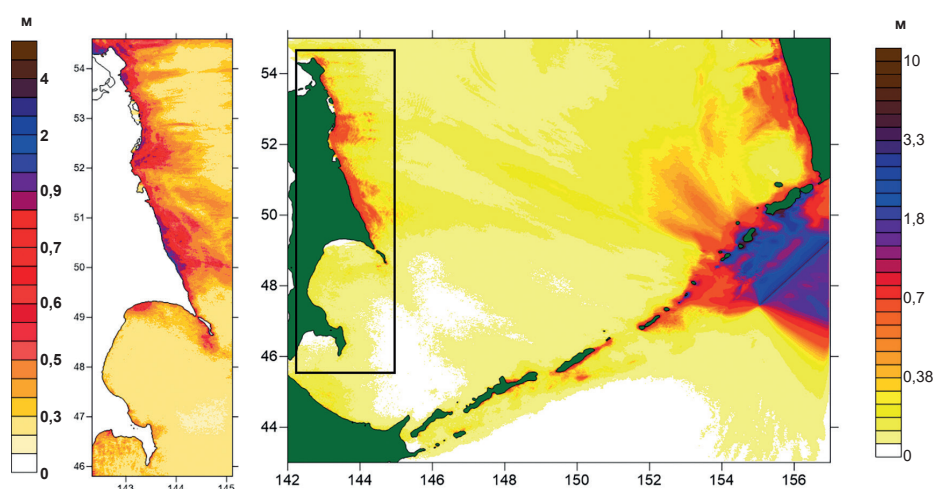


Рис. 3. Пространственное распределение максимальных амплитуд волн (источник — северные Курильские острова). По осям отложены долгота и широта в градусах

Fig. 3. Spatial distribution of maximum wave amplitudes (source — northern Kuril Islands). Longitude and latitude in degrees are deposited along the axes

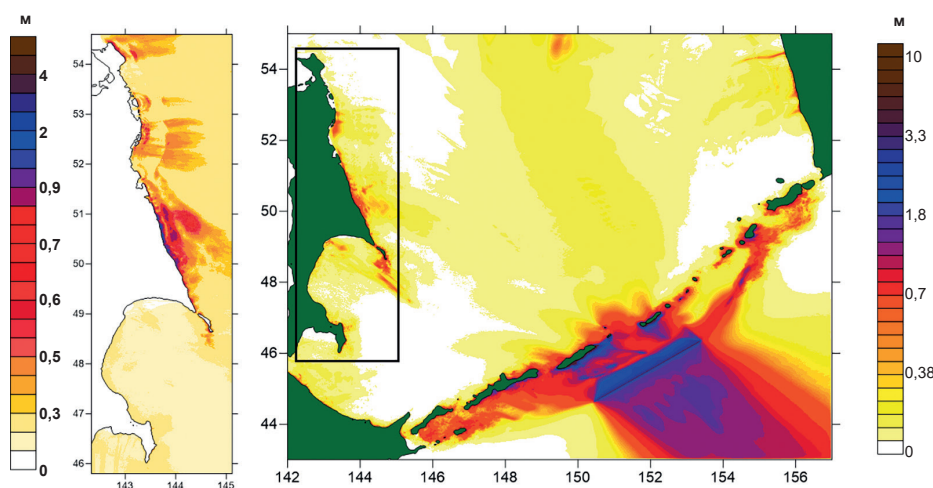


Рис. 4. Пространственное распределение максимальных амплитуд волн (источник — центральные Курильские острова). По осям отложены долгота и широта в градусах

Fig. 4. Spatial distribution of maximum wave amplitudes (sources — central Kuril Islands). Longitude and latitude in degrees are deposited along the axes

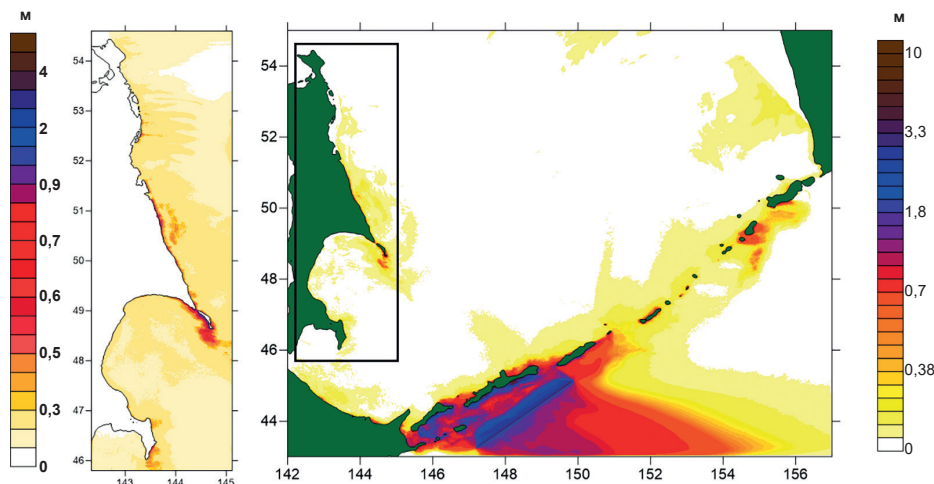


Рис. 5. Пространственное распределение максимальных амплитуд волн (источник — южные Курильские острова). По осям отложены долгота и широта в градусах

Fig. 5. Spatial distribution of maximum wave amplitudes (source — southern Kuril Islands). Longitude and latitude in degrees are deposited along the axes

Рассчитанное распределение высот цунами вдоль восточного побережья Сахалина представлено на рис. 6. Наибольшие значения высоты цунами достигаются при расположении очага цунами на Средних Курильских островах, и это обстоятельство необходимо учитывать в оценках цунами риска для населенных пунктов Сахалина.

5. Функции распределения высот волн

Рассчитанные высоты волн использованы для построения функции распределения высот заплесков вдоль побережья, определяющей вероятность превышения высоты волны заданного значения. Она задается расчетной формулой

$$P(H) = \begin{cases} 1, & H < H_1, \\ \frac{N-k}{N}, & H_1 < H < H_N, \\ 0, & H > H_N, \end{cases} \quad (4)$$

где N — число пунктов рассчитанных высот волн для каждого цунами и k — число пунктов, где высота волны превышает заданное значение или равна ему. Предусмотрено также построение теоретического логнормального распределения высот волн цунами вдоль побережья (Choi et al, 2002, 2017).

$$F(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln 10 \sigma} \int_H^{\infty} \exp\left(-\frac{(\lg h - a)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{dh}{h}, \quad (5)$$

где параметры распределения вычислены по наблюдаемым данным с помощью стандартных формул математической статистики

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lg H_i - a)^2}, \quad a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg H_i. \quad (6)$$

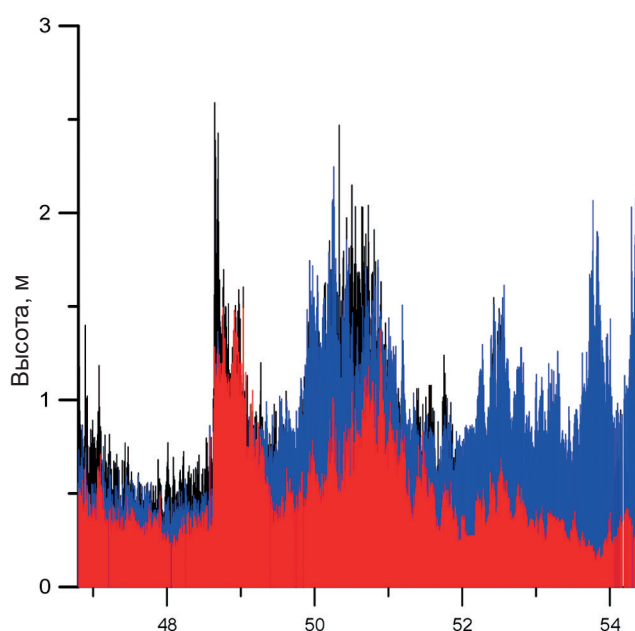


Рис. 6. Распределение высот волн цунами вдоль восточного побережья острова Сахалин (красный — источник «южные Курильские острова»; черный — источник «центральные Курильские острова»; синий — источник «северные Курильские острова»). По вертикальной оси широта вдоль восточного побережья о. Сахалин

Fig. 6. Distribution of tsunami wave heights along the eastern coast of Sakhalin Island (red — source “southern Kuril Islands”; black — the source “central Kuril Islands”; blue — source “Northern Kuril Islands”). Along the vertical axis, latitude along the east coast of Sakhalin Island

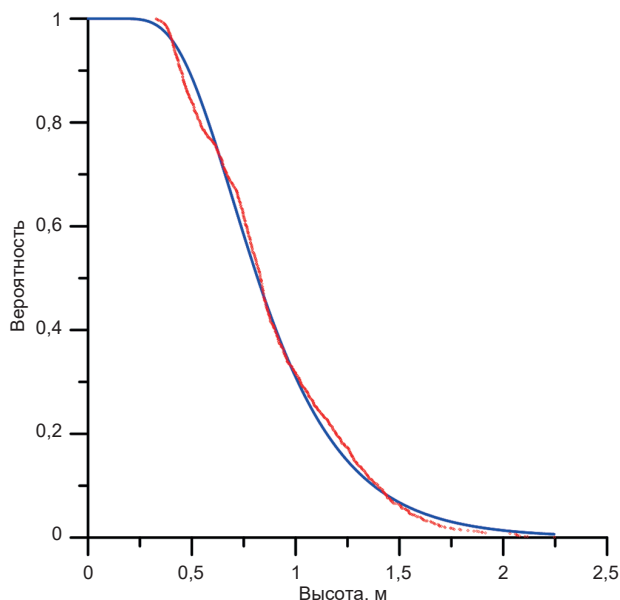


Рис. 7. Функции распределения высот волн цунами вдоль восточного побережья острова Сахалин, синяя линия — логнормальная кривая (источник «северные Курильские острова») $\sigma = 0,177013$

Fig. 7. Tsunami wave height distribution functions along the east coast of Sakhalin Island, blue line — lognormal curve (northern Kuril Islands source), $\sigma = 0,177013$

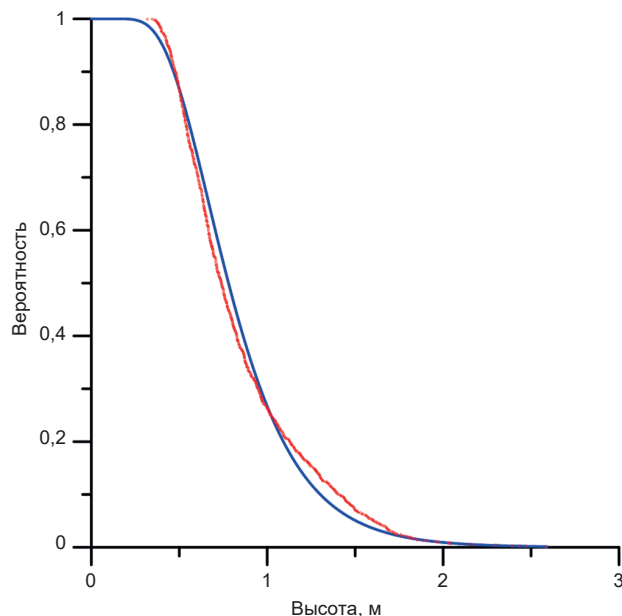


Рис. 8. Функции распределения высот волн цунами вдоль восточного побережья острова Сахалин, синяя линия — логнормальная кривая (источник «центральные Курильские острова»), $\sigma = 0,17405$

Fig. 8. Tsunami wave height distribution functions along the eastern coast of Sakhalin Island, blue line — lognormal curve (source “central Kuril Islands”), $\sigma = 0,17405$

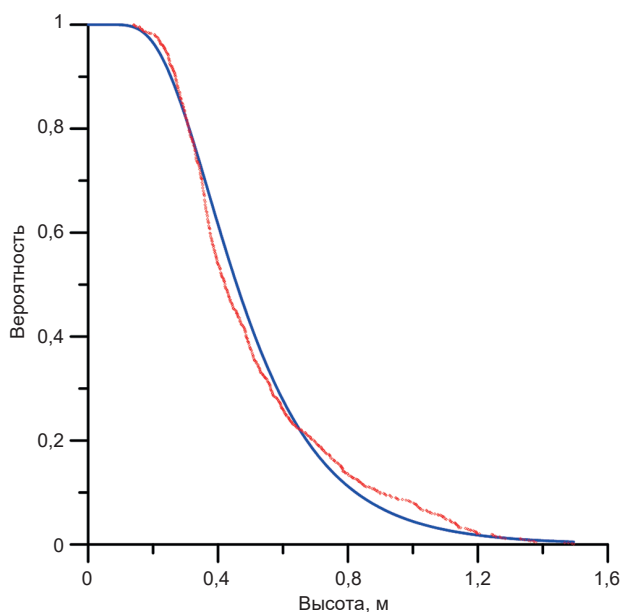


Рис. 9. Функции распределения высот волн цунами вдоль восточного побережья острова Сахалин, синяя линия — логнормальная кривая (источник «южные Курильские острова»), $\sigma = 0,200199$

Fig. 9. Tsunami wave height distribution functions along the eastern coast of Sakhalin Island, blue line — lognormal curve (source “southern Kuril Islands”), $\sigma = 0,200199$

Результаты расчетов функций распределения представлены на рис. 7–9. Синий линией здесь показана логнормальная кривая (5), а красной — данные расчетов. В целом можно сказать, что логнормальная кривая хорошо аппроксимирует данные численных расчетов, и этот вывод не зависит от положения очага вблизи Курильских островов. Параметры этих распределений, конечно, зависят от местоположения очага даже при одинаковых параметрах землетрясения, что лишний раз подчеркивает существенную роль батиметрии морского дна в в характеристики цунами на берегу. Тем не менее, функции распределения остаются логнормальными.

6. Выводы

Выполнены численные расчеты распространения волн цунами от гипотетического сильного землетрясения с магнитудой 8,3 в районе Курильских островов. Параметры землетрясения выбраны одинаковыми в различных расчетах, а вот положение очага цунами менялось вдоль Курильских островов. Демонстрируется, что высоты волн на восточном побережье острова Сахалин максимальны при расположении очага цунами в районе Средних Курил. Во всех сценариях рассчитанные функции распределения высот волн вдоль восточного побережья острова

Сахалин хорошо описываются логнормальным законом, который может использоваться для оценки сравнительного вклада волн разных высот.

Финансирование

Работа поддержана госзадаанием СКБ САМИ ДВО РАН тема № 123012000050-6 (раздел «Краткая сводка исторических цунами, наблюдавшихся на восточном побережье острова Сахалин»), госзадаанием ИПФ РАН тема № 0030-2021-0007 (раздел «Функции распределения высот волн»), и гранта РНФ № 23-27-00325 (разделы «Математическая модель распространения цунами» и «Результаты численных расчетов»).

Funding

The work was supported by the state assignment of the SRB AMR FEB RAS topic No. 123012000050-6 (section “Brief summary of historical tsunamis observed on the eastern coast of Sakhalin Island”), the state assignment of the IAP RAS topic No. 0030-2021-0007 (section “Wave height distribution functions”), and the grant of the Russian National Research Fund No. 23-27-00325 (sections “Mathematical model of tsunami propagation” and “Results of numerical calculations”)

Литература

1. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования. // Тихоокеанское побережье СССР. Тихоокеанский ежегодник. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 9–17.
2. Гусяков В.К., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Построение обзорных карт цунамирайонирования дальневосточного побережья РФ в рамках методики РТНА // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 1. С. 55–72. doi:10.25743/ICT.2019.24.1.005
3. Шокин Ю.И., Гусяков В.К., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б. Методика построения карт цунамиопасности и её реализация для Дальневосточного побережья Российской Федерации // Доклады Академии наук. 2019. Т. 489, № 4. С. 419–423. doi:10.31857/S0869-56524894419-423
4. Choi B.H., Pelinovsky E. Tsunamis along the coast. Hanrimwon Publishing Company, Korea. 2016. 206 p.
5. Didenkulova I., Zaitsev A., Pelinovsky E. Tsunami distribution functions along the coast: extended. // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, No. 8. P. 1137. doi:10.3390/jmse10081137
6. Соловьев С.Л. Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // Труды СахКНИИ. 1972. Вып. 29. С. 7–47.
7. Van Dorn W.G. Tsunamis // Advances in Hydrosceince, (Ed. V.T. Chow), Acad. Press, London, 1965. Vol. 2. P. 1–48.
8. Kajiwara K. Some statistics related to observed tsunami heights along the coast of Japan // Tsunamis — Their science and engineering. TERRAPUB, Tokyo. 1983. P. 131–145.
9. Go C.N. Statistical properties of tsunami runup heights on the coasts of the Kuril Isles and Japan // Tsunami along the Coast; Choi, B.H., Pelinovsky, E., Eds.; Seoul, Korea: Hanrimwon Publishing Co., 2016. P. 155–180.
10. Пелиновский Е.Н., Рябов И.А. Функции распределения высот заплесков цунами (по данным международных экспедиций 1992–1998 гг.) // Океанология. 2000. Т. 40, № 5. С. 645–652;
11. Kim D., Kim B.J., Lee S.-O., Cho Y.-S. Best-fit distribution and log-normality for tsunami heights along coastal lines // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2014. Vol. 28. P. 881–893. doi:10.1007/s00477-013-0778-y
12. Choi B.H., Hong S.J., Pelinovsky E. Distribution of runup heights of the December 26, 2004 tsunami in the Indian Ocean. // Geophysical Research Letters. 2006. Vol. 33, No. 13. L13601. doi:10.1029/2006GL025867
13. Choi B.H., Min B.I., Pelinovsky E., Tsuji Y., Kim K.O. Comparable analysis of the distribution functions of runup heights of the 1896, 1933 and 2011 Japanese Tsunamis in the Sanriku Area // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2012. Vol. 12. P. 1463–1467. doi:10.5194/nhess-12-1463-2012
14. Соловьев С.Л. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 61–138.
15. Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С. Каталог цунами в Тихом океане, 1969–1982. М.: Межведомственный геофизический комитет, 1986. 164 с.
16. Ким Х.С., Рабинович А.Б. Цунами на северо-западном побережье Охотского моря // Природные катастрофы и стихийные бедствия в дальневосточном регионе. Сборник научных трудов. Владивосток, 1990. Т. 1. С. 206–218.
17. Зайцев А.И., Костенко И.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Цунами на острове Сахалин: Наблюдения и численное моделирование. Нижний Новгород, 2016. 122 с.
18. Заякин Ю.А. Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996. 88 с.
19. MacInnes B.T., Bourgeois J., Pinegina T.K. et al. Field survey geological effects of the 15 november 2006 Kuril Tsunami in the middle Kuril Islands // Pure and Applied Geophysics. 2009. Vol. 166, No. 1–2. P. 9–36. doi:10.1007/978-3-0346-0064-4_2

20. Злобин Т.К., Левин Б.В., Полец А.Ю. Первые результаты сопоставления катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. ($M = 8.3$) и 13 января 2007 г. ($M = 8.1$) и глубинного строения земной коры центральных Курил // Доклады Академии наук. 2008. Т. 420, № 1. С. 111–115.
21. Zaytsev A.I., Dogan G.G., Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Yalciner A.C., Pelinovsky E.N. The 25 March 2020 tsunami at the Kuril Islands: analysis and numerical simulation // Science of Tsunami Hazards. 2020. Vol. 39, No. 4. P. 243–253.
22. Левин Б.В., Кайстренко В.М., Рыбин А.В. и др. Проявления цунами 15 ноября 2006 г. на центральных курильских островах и результаты моделирования заплесков // Доклады Академии наук. 2008. Т. 419, № 1. С. 118–122.
23. Zaytsev A., Kurkin A., Pelinovsky E., Yalciner A.C. Numerical tsunami model NAMI-DANCE // Science of Tsunami Hazards. 2019. Vol. 38, No. 4. P. 151–168.
24. Ozer Sozdinler C., Yalciner A.C., Zaytsev A. Investigation of tsunami hydrodynamic in inundation zones with different structural layouts // Pure and Applied Geophysics. 2015. Vol. 172, No. 3–4. P. 931–952. doi:10.1007/s00024-014-0947-z
25. Ozer Sozdinler C., Yalciner A.C., Zaytsev A., Suppasri A., Imamura F. Investigation of hydrodynamic parameters and the effects of breakwaters during the 2011 Great East Japan tsunami in Kamaishi Bay // Pure and Applied Geophysics. 2015. Vol. 172, No. 12. P. 3473–3491. doi:10.1007/s00024-015-1051-8
26. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. Vol. 75. No. 4. P. 1135–1154.

References

1. Go Ch. N., Kaistrenko V.M., Pelinovsky E.N., Simonov K.V. Quantitative assessment of tsunami hazard and tsunimiro-nation scheme. Pacific coast of the USSR. Pacific Yearbook. Vladivostok, DVO Academy of Sciences of the USSR, 1988, 9–17 (in Russian).
2. Gusev V.K., Kikhtenko V.A., Chubarov L.B., Shokin Yu.I. Regional tsunami hazard maps for the Far East coast of the Russian Federation built in the framework of the PTHA methodology. Computing Technologies. 2019, 24, 1, 55–72. doi 10.25743/ICT.2019.24.1.005 (in Russian)
3. Shokin Y.I., Kikhtenko V.A., Chubarov L.B., Gusev V.K. A methodology for mapping tsunami hazards and its im-plementation for the far eastern coast of the Russian Federation. Doklady Earth Sciences. 2019, 489, 2, 1444–1448. doi:10.1134/S1028334X19120092
4. Choi B.H., Pelinovsky E. Tsunamis along the coast. Hanrimwon Publishing Company, Korea. 2016, 206 p.
5. Didenkulova I., Zaitsev A., Pelinovsky E. Tsunami distribution functions along the coast: extended. Journal of Marine Science and Engineering. 2022, 10, 8, 1137. doi:10.3390/jmse10081137
6. Soloviev S.L. Recurrence of earthquakes and tsunamis in the Pacific Ocean. Proceedings of SakhKNII, 1972, 29, 7–47 (in Russian).
7. Van Dorn W.G. Tsunamis. Advances in Hydrosience (Ed. V.T. Chow), Acad. Press, London, 1965, 2, 1–48.
8. Kajiura K. Some statistics related to observed tsunami heights along the coast of Japan. Tsunamis — Their science and engineering, 1983. TERRAPUB, Tokyo, 131–145.
9. Go C.N. Statistical properties of tsunami runup heights on the coasts of the Kuril Isles and Japan. Tsunami along the Coast; Choi, B.H., Pelinovsky, E., Eds.; Hanrimwon Publishing Co., Seoul, Korea, 2016, 155–180.
10. Pelinovsky E.N., Ryabov I.A. Functions of distribution of tsunami spatula heights (according to international expeditions 1992–1998). Oceanology. 2000, 40, 5, 645–652.
11. Kim D., Kim B.J., Lee S.-O., Cho Y.-S. Best-fit distribution and log-normality for tsunami heights along coastal lines. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2014, 28, 881–893. doi:10.1007/s00477-013-0778-y
12. Choi B.H., Hong S.J., Pelinovsky E. Distribution of runup heights of the December 26, 2004 tsunami in the Indian Ocean. Geophysical Research Letters. 2006, 33, 13, L13601. doi:10.1029/2006GL025867
13. Choi B.H., Min B.I., Pelinovsky E., Tsuji Y., Kim K.O. Comparable analysis of the distribution functions of runup heights of the 1896, 1933 and 2011 Japanese Tsunamis in the Sanriku Area. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2012, 12, 1463–1467. doi:10.5194/nhess-12-1463-2012
14. Soloviev S.L. Basic data on the tsunami on the Pacific coast of the USSR. In the book: Studying the tsunami in the open ocean. M., Nauka, 1978, 61–138 (in Russian).
15. Soloviev S.L., Guo C.H., Kim H.S. Pacific Tsunami Catalogue, 1969–1982. M., Interdepartmental Geophysical Commit-tee, 1986. 164 p. (in Russian).
16. Kim H.S., Rabinovich A.B. Tsunami on the northwestern coast of the Sea of Okhotsk. Natural disasters and natural disas-ters in the Far Eastern region. Collection of scientific works. Vladivostok, 1990, 1, 206–218 (in Russian).
17. Zaitsev A.I., Kostenko I.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N. Tsunami on Sakhalin Island: Observations and numerical mod-eling. Nizhny Novgorod, 2016. 122 p. (in Russian).

18. Zayakin Yu.A. Tsunami in the Russian Far East. *Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamshat*, 1996. 88 p. (in Russian).
19. MacInnes B.T., Bourgeois J., Pinegina T.K. et al. Field survey geological effects of the 15 november 2006 Kuril Tsunami in the middle Kuril Islands. *Pure and Applied Geophysics*. 2009, 166, 1–2, 9–36. doi:10.1007/978-3-0346-0064-4_2
20. Zlobin T.K., Levin B.W., Polets A. Yu. First results of the comparison of Catastrophic Simushir earthquakes on November 15, 2006 ($M = 8.3$), and January 13, 2007 ($M = 8.1$), with the deep structure of the Earth's crust in the central Kuril Islands. *Doklady Earth Sciences*. 2008, 420, 1, 615–619.
21. Zaytsev A.I., Dogan G.G., Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Yalciner A.C., Pelinovsky E.N. The 25 March 2020 tsunami at the Kuril Islands: analysis and numerical simulation. *Science of Tsunami Hazards*. 2020, 39, 4, 243–253.
22. Levin B.W., Kaistrenko V.M., Rybin A.V. et al. Manifestations of the Tsunami on November 15, 2006, on the central Kuril Islands and results of the runup heights modeling. *Doklady Earth Sciences*. 2008, 419, 1, 335–338.
23. Zaytsev A., Kurkin A., Pelinovsky E., Yalciner A.C. Numerical tsunami model NAMI-DANCE. *Science of Tsunami Hazards*. 2019, 38, 4, 151–168.
24. Ozer Sozdinler C., Yalciner A.C., Zaytsev A. Investigation of tsunami hydrodynamic in inundation zones with different structural layouts. *Pure and Applied Geophysics*. 2015, 172, 3–4, 931–952. doi:10.1007/s00024-014-0947-z
25. Ozer Sozdinler C., Yalciner A.C., Zaytsev A., Suppasri A., Imamura F. Investigation of hydrodynamic parameters and the effects of breakwaters during the 2011 Great East Japan tsunami in Kamaishi Bay. *Pure and Applied Geophysics*. 2015, 172, 12, 3473–3491. doi:10.1007/s00024-015-1051-8
26. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1985, 75(4), 1135–1154.

Об авторах

ЗАЙЦЕВ Андрей Иванович, РИНЦ Author ID: 133746, ORCID ID: 0000-0002-1383-363X,
Scopus Author ID: 36866694500, WoS Researcher ID: A-1772–2014, aizaytsev@mail.ru

ПЕЛИНОВСКИЙ Ефим Наумович, РИНЦ Author ID: 103314, ORCID ID: 0000-0002-5092-0302,
Scopus Author ID: 7004951110, WoS Researcher ID: I-3670–2013, pelinovsky@ipfran.ru