

Научная статья

УДК 551.465
EDN: NHICEB

Сравнительное численное моделирование волн цунами при землетрясении 1 января 2024 года на полуострове Ното, Япония

Р. Х. Мазова¹, А. А. Мартыненко², А. А. Куркин^{1, 3, ✉}

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

² Автономная некоммерческая организация высшего образования «Центральный университет», Москва, Россия

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия
✉ aakurkin@gmail.com

Поступила в редакцию 17.07.2024; одобрена после рецензирования 29.07.2024; принята к публикации 12.09.2024.

Аннотация

Цель. Проведено сравнительное численное моделирование генерации и распространения волн цунами, порожденных очагом землетрясения магнитудой $M = 7,6$ 1 января 2024 г. на полуострове Ното, в префектуре Исикава, Япония.

Методы и результаты. Моделирование проведено для четырех различных вариантов сейсмического очага в рамках блочно-клавишного механизма очага землетрясения. Был рассмотрен многоблочный очаг, в котором при моделировании землетрясения задавалось последовательное движение блоков-клавиш. Показано, что динамика данного процесса в сейсмическом очаге будет определять формирование соответствующего очага цунами и волновых фронтов, распространяющихся от этого очага, а также что форма очага землетрясения существенно влияет на значения максимальных высот волн в акватории. С использованием информации с приливных станций Японского моря, пролива Цугару и Татарского пролива выполнено сравнение максимальных значений амплитуд волн цунами из реальных записей на этих станциях и расчетных мареограмм, полученных в результате численного моделирования при различной динамике блоков в сейсмическом очаге.

Выводы. Показано, что с помощью клавишной модели землетрясения возможно адекватно моделировать даже сложные очаги такого землетрясения, как произошедшее на северо-западе полуострова Нота, на западном побережье о. Хонсю, где, кроме большого количества населенных пунктов, находятся крупнейшие действующие японские АЭС.

Ключевые слова: цунами 2024, полуостров Ното, Япония, очаг землетрясения, численное моделирование

Благодарности: работа выполнена при поддержке Лаборатории нелинейной гидрофизики и природных катастроф ТОИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН, грант Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-1127 от 01.07.2022.

Для цитирования: Мазова Р. Х., Мартыненко А. А., Куркин А. А. Сравнительное численное моделирование волн цунами при землетрясении 1 января 2024 года на полуострове Ното, Япония // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 706–722. EDN NHICEB.

© Мазова Р. Х., Мартыненко А. А., Куркин А. А., 2024

Comparative Numerical Simulation of Tsunami Waves during the January 1, 2024 Noto Peninsula Earthquake, Japan

R. Kh. Mazova¹, A. A. Martynenko², A. A. Kurkin^{1,3,✉}

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

² Autonomous Non-Commercial Organization of Higher Education “Central University”, Moscow, Russia

³ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

✉ aakurkin@gmail.com

Abstract

Purpose. The purpose of the work consists in performing a comparative numerical simulation of generation and propagation of tsunami waves induced by the $M = 7.6$ earthquake on January 1, 2024 on the Noto Peninsula, Ishikawa Prefecture, Japan.

Methods and Results. Four different variants of a seismic source are simulated within the framework of the earthquake source keyboard mechanism. A multi-block source is considered, in which, while modeling the earthquake, a sequential motion of key-blocks was specified. It is shown that the dynamics of this process in a seismic source will determine the formation of corresponding tsunami source and wave fronts propagating from this source, and that the shape of earthquake source significantly affects the values of maximum wave heights in the water area. Applying the information from the tide-gauge stations in the Sea of Japan, and the Tsugaru and Tatar straits permits to compare the real records of maximum values of the tsunami wave amplitudes at these stations and the computed tide-gauge ones resulted from numerical modeling of different dynamics of keyboard blocks in the seismic source.

Conclusions. It is shown that using the keyboard model of earthquakes, one can adequately simulate even such complex earthquake sources as the one that occurred in the northwest of the Noto Peninsula and on the western coast of Honshu Island where, besides a great number of settlements, the largest Japanese operating nuclear power plants are located.

Keywords: 2024 tsunami, Noto Peninsula, Japan, earthquake source, numerical simulation

Acknowledgments: The study was supported by the Laboratory of nonlinear hydrophysics and natural disasters of POI n. a. R. E. Alekseev, FEB of RAS, grant of the Ministry of Science and Higher Education of RF, agreement No. 075-15-2022-1127 dated July 1, 2022.

For citation: Mazova, R.Kh., Martynenko, A.A. and Kurkin, A.A., 2024. Comparative Numerical Simulation of Tsunami Waves during the January 1, 2024 Noto Peninsula Earthquake, Japan. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 662-678.

Введение

Хорошо известно, что Япония входит в десятку самых сейсмоопасных стран мира¹. Расположенная в Тихоокеанском огненном кольце, страна за всю свою историю пережила множество разрушительных землетрясений, таких как, например, землетрясение 17 января 1995 г. с магнитудой 7,3 на западе японского острова Хонсю, в результате которого погибло более 6,4 тыс. человек [1]; землетрясение 11 марта 2011 г. магнитудой 9 с последующим цунами

¹ ‘Battle against time’ to find quake survivors as Japan lifts tsunami warnings and death toll rises / H. Regan [et al.] // CNN : site. 2024. 2 Jan. URL: <https://edition.cnn.com/2024/01/02/asia/japan-earthquake-tsunami-warnings-tuesday-intl-hnk/index.html> (дата обращения: 28.02.2024).

высотой от 3 до 15 м, обрушившимся на побережья о-вов Хонсю и Хоккайдо. В результате этого стихийного бедствия² погибло более 28 тыс. человек и произошло загрязнение обширных территорий радиоактивными веществами от АЭС «Фукусима I» [2, 3].

Высокая сейсмическая активность связана с тем, что архипелаг расположен на стыке сразу нескольких литосферных плит, две из которых – Филиппинская и Тихоокеанская – находятся в движении. Это приводит к значительному количеству интенсивных подземных толчков, которые, как правило, сопровождаются землетрясениями и цунами. В год в Японии происходит несколько тысяч землетрясений, в среднем 18 толчков в день. Однако сильные землетрясения, сопровождающиеся цунами, бывают значительно реже: раз в 10 лет – с магнитудой $M = 8$, раз в год – с $M = 6$ (см. на сайтах^{1, 3, 4} и в работе [4]).

Мы рассматриваем сильное землетрясение ($M = 7,6$), произошедшее 1 января 2024 г. на п-ове Ното в префектуре Исикава, Япония. В результате серии подземных толчков были вызваны массовые разрушения в городах Судзу, Ваджима, Ното и Анамидзу. При этом в соседних префектурах Тояма и Ниигата также зафиксирован значительный ущерб. В результате этого землетрясения в ряде регионов о-ва Хонсю была объявлена угроза цунами. Японским метеорологическим агентством была выпущена карта предупреждения о цунами, по которой, предположительно, к западному побережью острова волны цунами должны были подойти высотой 5 м (рис. 1).

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования генерации волн цунами сейсмическим очагом, сформированным в рамках блочно-клавишной модели очага землетрясения [5]. С начальными движениями дна при землетрясении связана наибольшая неопределенность в расчете возможных сценариев развития цунами. При использовании блочно-клавишной модели задание перемещений и скоростей дна во время землетрясения обеспечивает решение задачи о формировании волны цунами. При этом движение блоков-клавиш моделируется согласно афтершоковой стадии процесса. После окончания афтершоковой стадии развития блоки останавливаются. При сильнейших землетрясениях, имеющих длину разрыва в несколько сотен километров, их очаги могут охватывать множество блоков.

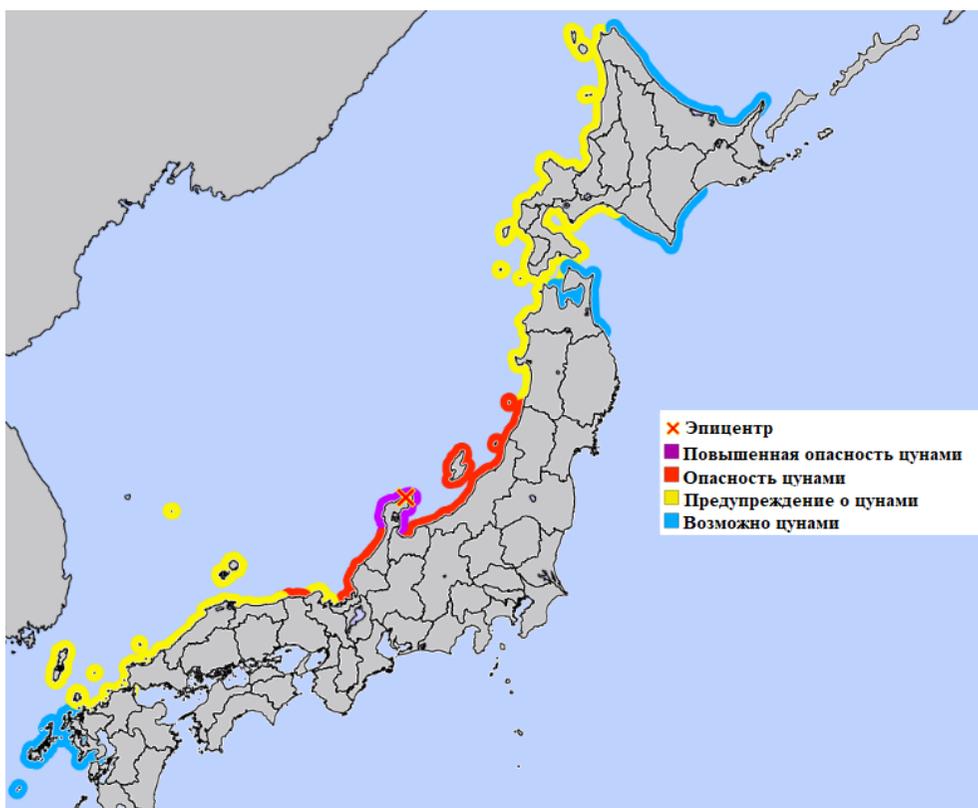
В данной работе рассмотрен пятиблочный очаг землетрясения, генерация очага цунами при различной локализации сейсмического очага и различных кинематических процессах движения блоков-клавиш в очаге. Анализ волновых характеристик, полученных при моделировании различных локализаций и различной динамики сейсмического очага, приводит к выводам о неоднородности выбранной модели процесса.

² Хронология землетрясений с погибшими в Японии // TASS : сайт. 2024. 2 янв. URL: <https://tass.ru/info/19667253> (дата обращения: 28.09.2024).

³ URL: <https://web.archive.org/web/20240101100413/https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#5/38.891/141.24/&elem=warn&contents=tsunami> (дата обращения: 10.05.2024).

⁴ URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map> (дата обращения: 10.05.2024).

Цель работы – сравнительное численное моделирование генерации и распространения волн цунами, порожденных очагом землетрясения магнитудой $M = 7,6$ 1 января 2024 г. на п-ове Ното, в префектуре Исикава, Япония.



Р и с. 1. Карта цунамиопасности для о-ва Хонсю, выпущенная Японским метеорологическим агентством 1 января 2024 г. ³

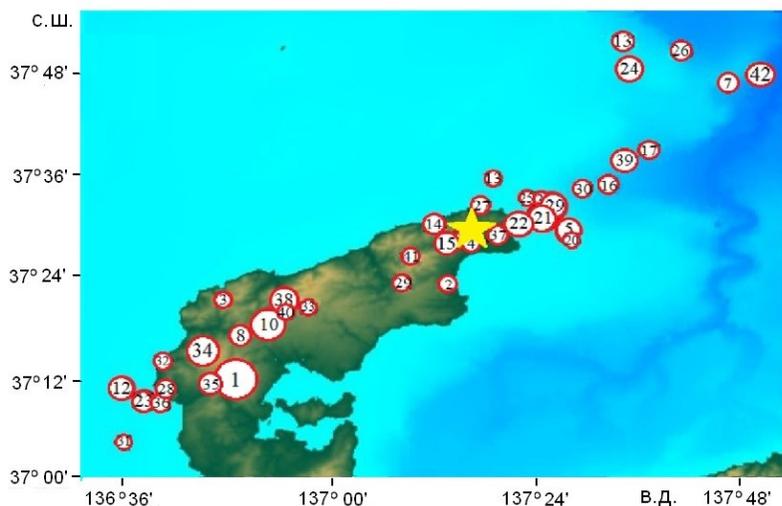
F i g. 1. Tsunami hazard map for Honshu Island published by the Japan Meteorological Agency on January 1, 2024 ³

Постановка задачи

Афтершоковая стадия процесса

Используя данные работ [6–9], мы проанализировали последовательность афтершоковой стадии процесса землетрясения. Данные об афтершоках были получены с *U.S. Geological Survey* ⁵ и приведены на рис. 2. После основного толчка землетрясения 01.01.2024 в 7:10:09 UTC в течение трех суток произошло еще 42 толчка с $M > 4,5$ (табл. 1).

⁵ URL: <https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php> (дата обращения: 10.05.2024).
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 5 2024



Р и с. 2. Афтершоки после землетрясения 01.01.2024 на п-ове Ното (желтая звездочка – эпицентр землетрясения; кружки с цифрами обозначают порядок афтершоков ⁵⁾

F i g. 2. Aftershocks after the 01/01/2024 earthquake on the Noto Peninsula (yellow star is the earthquake epicenter; circles with numerals indicate the order of aftershocks ⁵⁾

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Все афтершоки при $M > 4,5$ после землетрясения 01.01.2024 с 01.01.2024 по 03.01.2024
All aftershocks at $M > 4.5$ from 01/01/2024 to 03/01/2024 after the earthquake on January 1, 2024

№ п/п / s/n	M	Время (UTC) / Time (UTC)	№ п/п / s/n	M	Время (UTC) / Time (UTC)	№ п/п / s/n	M	Время (UTC) / Time (UTC)
0	7,5	7:10:09	15	4,9	8:22:10	30	4,6	17:33:30
1	6,2	7:18:41	16	4,7	8:29:02	31	4,5	19:27:14
2	4,6	7:27:28	17	4,6	8:42:04	32	4,6	19:42:06
3	4,6	7:28:15	18	4,5	8:48:21	33	4,5	22:13:30
4	4,7	7:29:04	19	5,5	9:03:48	34	5,4	1:17:31
5	5,2	7:39:49	20	4,6	9:06:13	35	4,8	6:57:54
6	4,8	7:42:43	21	5,6	9:08:17	36	4,6	8:13:40
7	4,7	7:45:30	22	5,2	9:30:21	37	4,8	17:21:47
8	4,8	7:48:14	23	5,0	9:39:59	38	5,3	1:54:34
9	4,7	7:54:21	24	5,1	9:54:26	39	4,9	3:54:13
10	5,6	7:56:47	25	4,6	9:49:15	40	4,7	9:48:00
11	5,0	8:02:44	26	4,6	10:06:54	41	4,6	15:36:53
12	5,1	8:07:10	27	4,7	10:50:35	42	4,8	19:38:41
13	4,5	8:15:38	28	4,6	11:35:32			
14	4,8	8:17:46	29	4,5	13:19:57			

Формирование очага цунами в рамках клавишной модели сейсмического очага землетрясения

Поскольку механизм формирования сейсмических очагов неизвестен, то, задавая механизм очага из тектонических соображений, базируясь на известных значениях магнитуды землетрясения и афтершоков, а также используя распределение афтершоков с $M > 4,5$, можно рассчитать ориентировочные размеры сейсмического источника и его динамику. Для расчета размеров источника используются формулы [10]

$$\begin{cases} \lg L = 0,59 M - 2,44, \\ \lg W = 0,32 M - 1,01, \end{cases}$$

где M – магнитуда землетрясения; L – протяженность разрыва в очаге, км; W – ширина плоскости разрыва, км.

Максимальное вертикальное смещение волновой поверхности над очагом землетрясения находится по формуле⁶

$$\lg(H) = 0,8M - 5,6,$$

где H – максимальная высота вертикального смещения волновой поверхности над очагом землетрясения, м. Оценочные смещения данных характеристик, используемые для моделирования очага цунами⁶ [10], представлены ниже:

M_w	L , км	W , км	S , км ²	H , м
7,5	78 ± 18	43 ± 6	3354 ± 440	4,8

Для моделирования были приняты длина очага 78 км и ширина 43 км. Так как в силу несжимаемости жидкости и гидростатичности давления поверхность океана поднимется на ту же величину, на которую сместился блок на дне, а из формулы Ииды получено смещение 4,8 м, то максимальное вертикальное смещение блока в клавишном очаге землетрясения мы взяли 4,8 м.

Математическая постановка задачи

Рассматривается процесс генерации волн цунами в приближении теории мелкой воды. Для моделирования были использованы уравнения, описывающие нелинейную систему уравнений мелкой воды в двумерной постановке (см., например, работу⁷ и [11]):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\eta + H - B)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(\eta + H - B)v] = \frac{\partial B}{\partial t}. \end{array} \right.$$

⁶ Пелиновский Е. Н. Нелинейная динамика волн цунами. Горький : ИПФАН СССР, 1982. 226 с.

⁷ Вольцингер Н. Е., Клеванный К. А., Пелиновский Е. Н. Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л. : Гидрометеоиздат, 1989. 272 с.

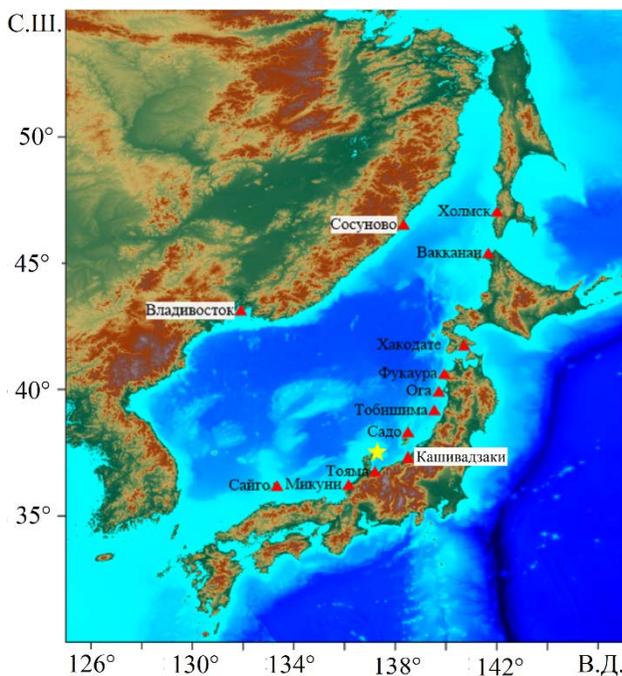
Считаем, что ось z направлена вертикально вверх; x, y – пространственные координаты; $u(x, t), v(y, t)$ – горизонтальные компоненты скорости, $\eta(x, y, t)$ – возмущение свободной поверхности относительно спокойного уровня; H – максимальная глубина бассейна; функция $B(x, y, t)$ определяет изменение дна бассейна (учет характеристик динамического сейсмического очага). В начальный момент времени в области решения задаются параметры динамического сейсмического очага (координаты, скорость смещения блоков-клавиш). Считаем, что перед началом генерации вода, заполняющая область с начальной формой дна, покоится, т. е. скорость и возмущение свободной поверхности отсутствовали:

$$\eta(x, y, 0) = 0; u(x, 0) = 0; v(x, 0) = 0.$$

В последней мористой точке на глубине 5 м поставлено условие полного отражения (вертикальная стенка), позволяющее зафиксировать на этой глубине максимальное и минимальное смещение волнового уровня. Расчетная область, применяемая для данных расчетов, составила $125,01^\circ$ – $147,00^\circ$ в. д., $30,01^\circ$ – $55,00^\circ$ с. ш. с сеткой, которая имела шаг $30' \approx 759$ м. При численном решении использовалась схема, построенная по аналогии со схемой Силески [3].

Численное моделирование цунами в рамках клавишной модели сейсмического очага

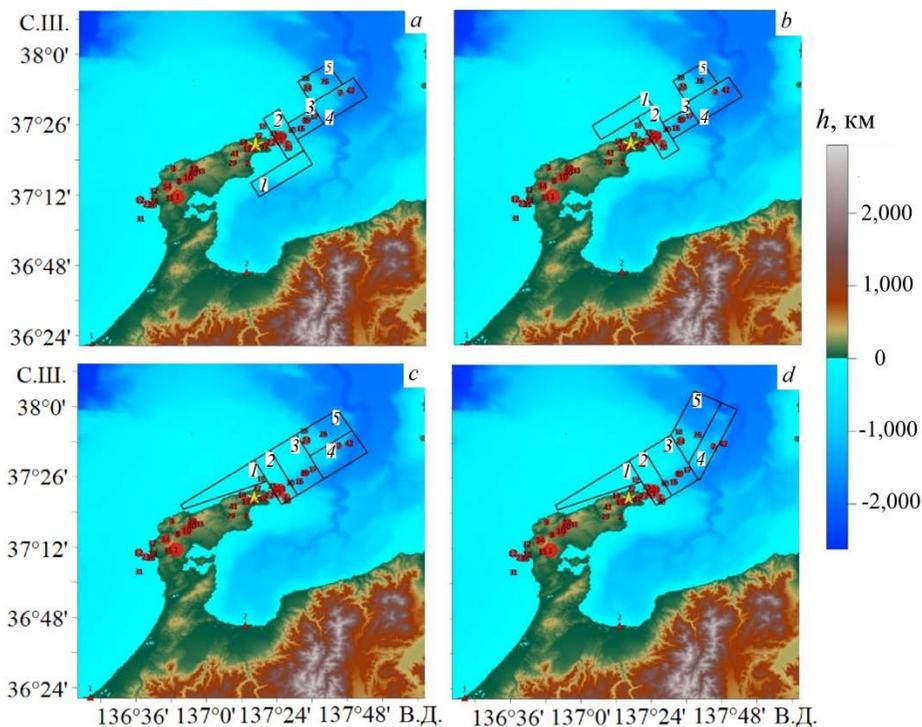
На рис. 3 представлена расчетная акватория с пунктами локализации мареографных станций [7].



Р и с. 3. Расчетная акватория (желтая звездочка – эпицентр землетрясения; красные треугольники – расположение мареографных станций [7])

Fig. 3. Calculated water area (yellow star is the earthquake epicenter; red triangles denote the location of tide-gauge stations [7])

В работе было рассмотрено четыре сценария с разной локализацией очага землетрясения (рис. 4). На рис. 4, *a* приведен сценарий 1 с блоком 2 в районе зал. Тояма (*Toyama bay*) к юго-востоку от п-ова Ното. На рис. 4, *b* такой же блок расположен в Японском море к северо-западу от п-ова Ното. Расположение остальных блоков в очаге землетрясения для этих сценариев аналогично. Для сценария 3 локализация очага изображена на рис. 4, *c*. Можно видеть, что блок, расположенный к северо-западу от полуострова, принял треугольную форму, вытянутую вдоль всего полуострова. Форма остальных блоков также изменилась. В сценарии 4 форма блоков 1–3 не изменилась, но изменилось направление расположения блоков 4 и 5. Такое изменение локализации, размеров и ориентации блоков связано со сравнением результатов моделирования с натурными данными и данными других авторов. Всего было проведено 14 вариантов моделирования, 4 из которых будут приведены в данной работе.



Р и с. 4. Сценарии моделирования при различной локализации сейсмического очага: 1 (*a*); 2 (*b*); 3 (*c*); 4 (*d*) (1 – 5 – номера блоков-клавиш)

F i g. 4. Simulation of the scenarios of the seismic source different locations: 1 (*a*); 2 (*b*); 3 (*c*); 4 (*d*) (1 – 5 are the key-block numbers)

В табл. 2 приведена кинематика движения блоков-клавиш в очаге землетрясения. Для всех сценариев очаг состоит из пяти блоков, совершающих последовательные движения через определенные интервалы времени. Анализ временной последовательности появления афтершоков позволяет создать оценочный вариант кинематики движения блоков-клавиш в сейсмическом очаге.

В сценарии 1 блоки совершают последовательные движения через одинаковые интервалы времени 30 с. В сценарии 2 блоки также совершают последовательные движения через одинаковые интервалы времени 30 с, но с отрицательными значениями смещения. В сценариях 3 и 4 разнонаправленные смещения блоков сохраняются. В сценарии 3 блоки совершают последовательные движения через разные интервалы времени в диапазоне 60–140 с. В сценарии 4 блоки совершают последовательные движения через разные интервалы времени от 60 до 130 с. Рисунок 5 иллюстрирует процесс генерации очага цунами в сценариях 1 и 4, что наглядно соответствует локализациям очага землетрясения, приведенным на рис. 4, *a* и *d*.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

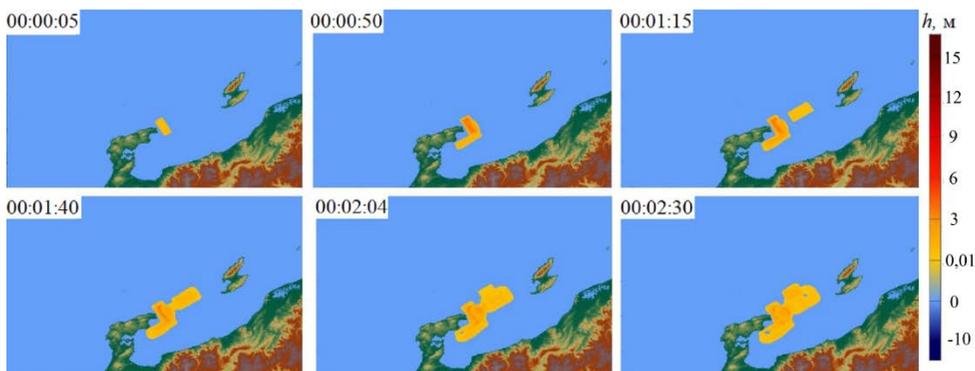
Кинематика движения блоков в очаге землетрясения в четырех сценариях
Kinematics of block motion in the earthquake source in four scenarios

Параметр / Parameter	Номер блока / Block number				
	1	2	3	4	5
<i>Сценарий 1 / Scenario 1</i>					
Высота смещения, м / Displacement height, m	1,5	3	1	1	1
Время начала движения, с / Start time of motion, s	30	0	90	60	120
Время конца движения, с / End time of motion, s	60	30	120	90	150
<i>Сценарий 2 / Scenario 2</i>					
Высота смещения, м / Displacement height, m	2	1	–1	1	–1
Время начала движения, с / Start time of motion, s	0	30	90	60	120
Время конца движения, с / End time of motion, s	30	60	120	90	15
<i>Сценарий 3 / Scenario 3</i>					
Высота смещения, м / Displacement height, m	3	1,4	–1,3	1,5	1,2
Время начала движения, с / Start time of motion, s	0	90	190	350	520
Время конца движения, с / End time of motion, s	30	120	220	380	550
<i>Сценарий 4 / Scenario 4</i>					
Высота смещения, м / Displacement height, m	3,2	–1,1	–0,2	0,2	1,3
Время начала движения, с / Start time of motion, s	0	90	190	350	440
Время конца движения, с / End time of motion, s	30	120	220	380	470

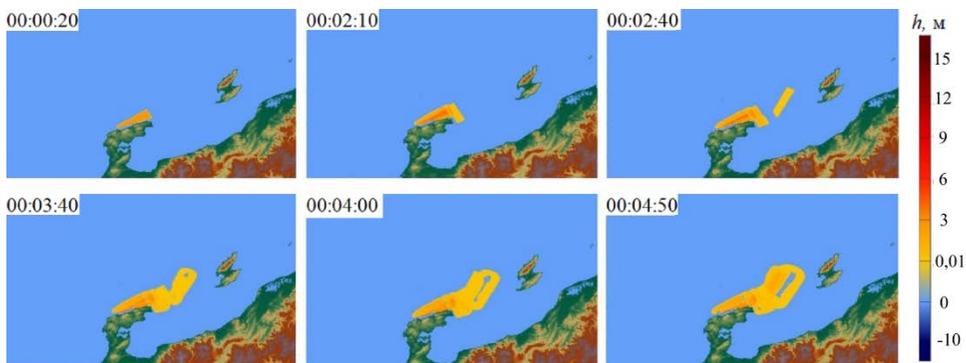
На рис. 5 видно, что смещение поверхности воды соответствует смещению блоков, представленному в табл. 2 для сценариев 1 и 4. Основное отличие связано с изменением локализации и формы блока 1 со сдвигом к юго-востоку (сценарий 1) или к северо-западу (сценарий 4) от п-ова Ното. Конфигурация блоков 2–5 различается не существенно.

На рис. 6 приведено положение волновых фронтов для девяти моментов времени. Хорошо видно, что спустя 10 мин после начала генерации волны высотой 1 м доходят до о. Садо, причем волны двигаются в эту сторону быстрее, чем в сторону залива, что связано с глубоководной впадиной Тояма. По истечении 30 мин волновой фронт достиг прибрежных городов Кашивазаки и Тояма. На 45-й минуте волновой фронт высотой 0,5 м достиг северной части о. Хонсю и огибает п-ов Ното. Спустя 1 ч 45 мин после землетрясения волны высотой ~ 20 см достигают г. Владивостока и южной части о. Хоккайдо. В 5:56:30 волновой фронт достиг г. Холмса, расположенного в северной части о. Сахалин.

По распределению высот на рис. 7 видно, что имеет место хорошее согласие с рис. 1, где наиболее опасной областью являются побережья, расположенные в северо-восточной части п-ова Ното, а также города Тояма, Садо и Кашивазаки. Расчет проводится до 5-метровой изобаты.



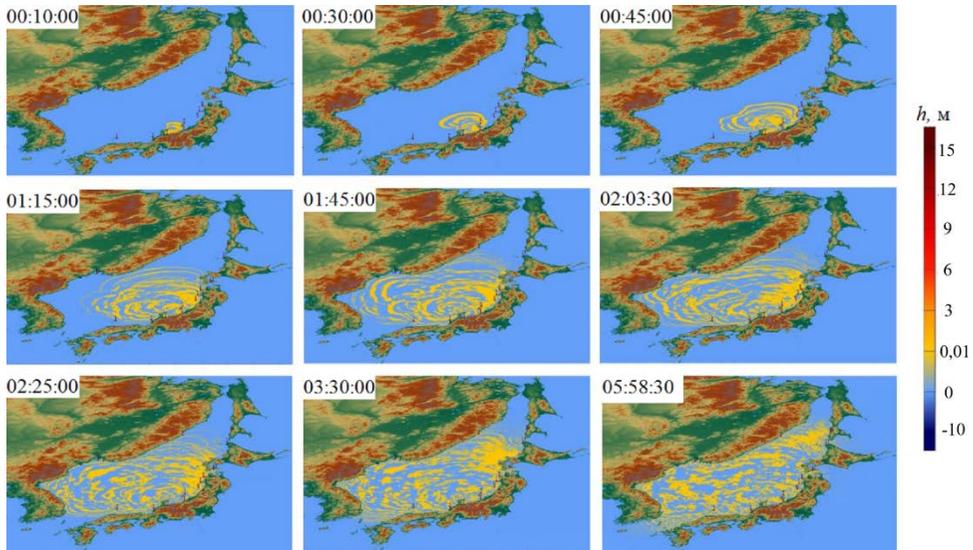
a



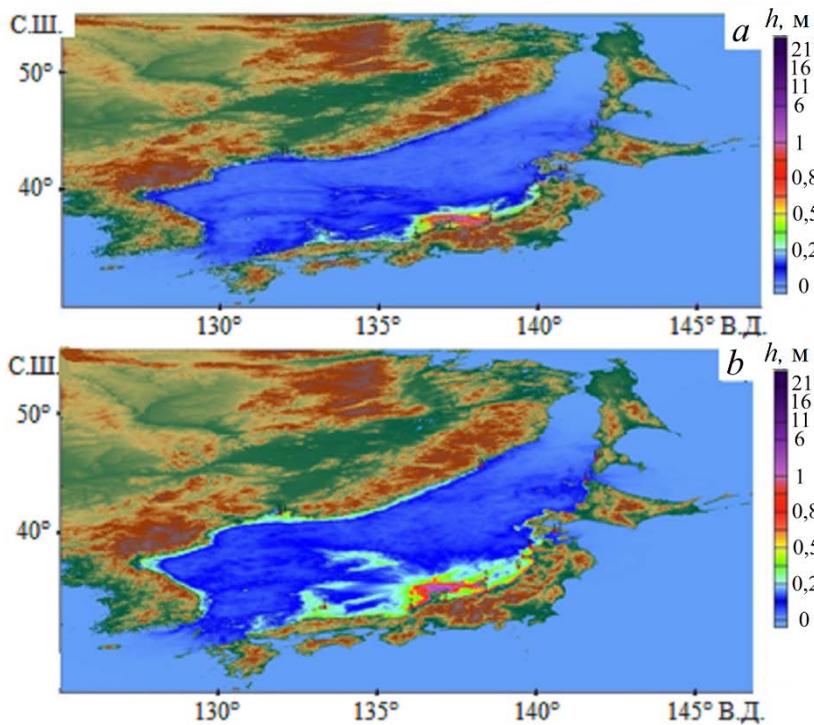
b

Р и с. 5. Генерация очага цунами в шесть моментов времени в сценариях 1 (*a*) и 4 (*b*)

Fig. 5. Generation of a tsunami source at six time points in scenarios 1 (*a*) and 4 (*b*)

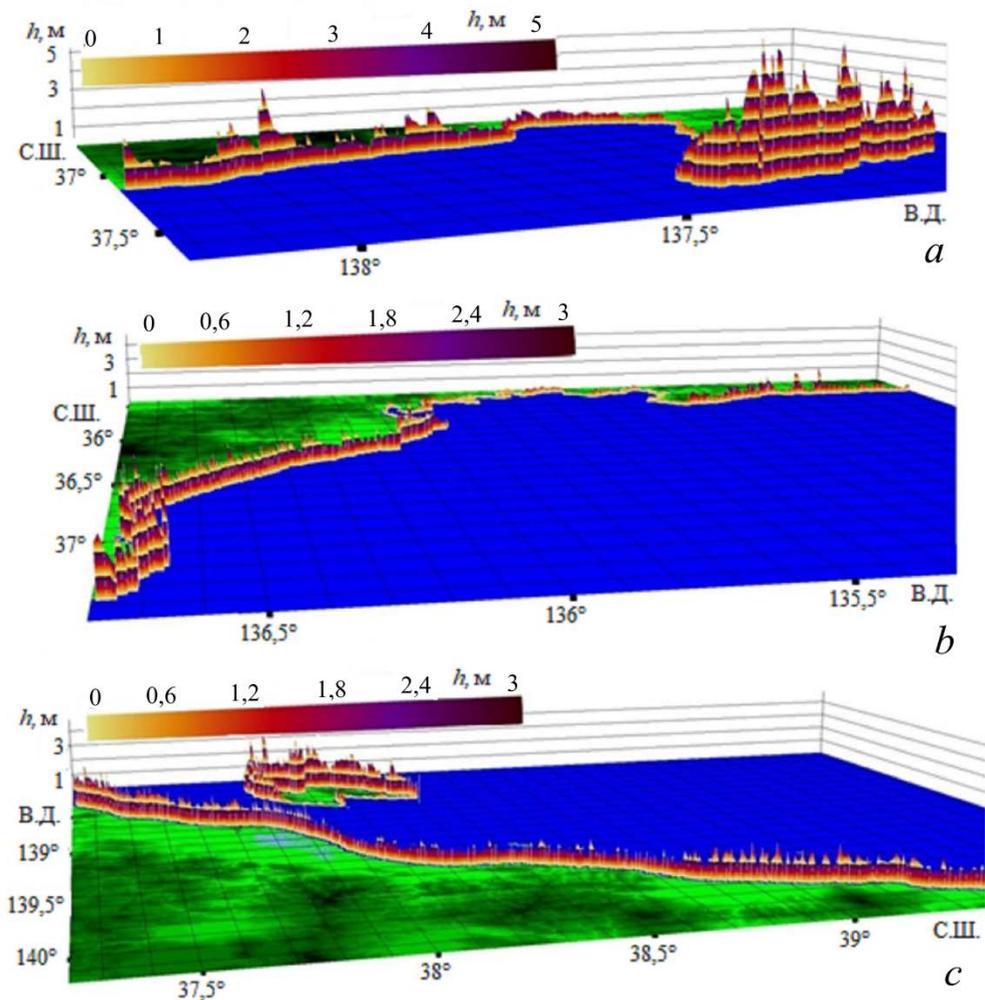


Р и с. 6. Распространение волн цунами по расчетной акватории в сценарии 4
F i g. 6. Propagation of tsunami waves across the calculated water area in scenario 4



Р и с. 7. Распределение максимальных высот волн по расчетной акватории в сценариях 1 (a) и 4 (b)
F i g. 7. Distribution of maximum wave heights across the calculated water area in scenarios 1 (a) and 4 (b)

С использованием данных расчета по сценарию 4 были построены 3D-гистограммы распределения высот в зал. Тояма, в районах Чюба, Тохоку, Кансай и о. Садо (рис. 8). Хорошо видно, что средняя высота пришедших волн в зал. Тояма равна 1 м, а на западной части п-ова Ното – 5 м.

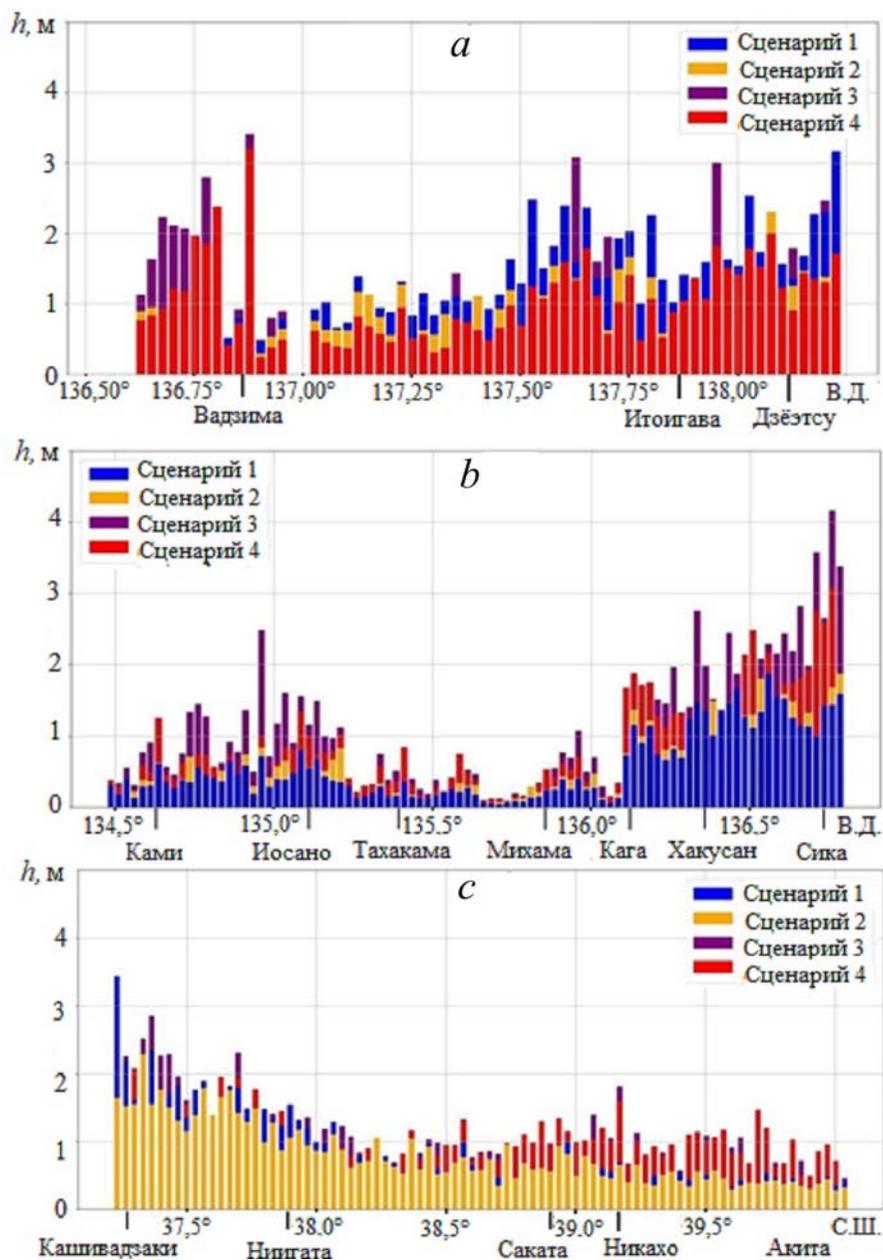


Р и с. 8. 3D-гистограммы высоты волн: *a* – зал. Тояма; *b* – район Чюба и Кансай; *c* – район Тохоку и о. Садо (синий цвет – море, зеленый – суша)
F i g. 8. 3D histograms of wave heights: *a* – Toyama Bay; *b* – Chubu and Kansai area; *c* – Tohoku region and Sado Island (blue color denote sea, green color – land)

На рис. 8, *b* можно видеть, что высота волн в южной части п-ова Ното составила 3 м, а далее в районе Чюба средняя высота волн была 1 м. На рис. 8, *c* хорошо видно, что средняя высота волн, пришедших в северную часть района Тохоку, составила 1 м, однако высота волн на северной части о. Садо была в среднем 2,5 м.

Анализ результатов численного моделирования цунами при землетрясении 01.01.2024 в Японии

На рис. 9 приведены 2D-гистограммы высоты волн цунами для различных участков расчетных побережий в четырех рассматриваемых сценариях.



Р и с. 9. 2D-гистограммы высот волн: *a* – зал. Тояма; *b* – район Чюба и Кансай; *c* – район Тохоку и о. Садо

F i g. 9. 2D histograms of wave heights: *a* – Toyama Bay; *b* – Chuba and Kansai area; *c* – Tohoku region and Sado Island

На рис. 9, *a* хорошо видно, что в районе пос. Вадзима высота волн в 3-м и 4-м сценариях составляет 3 м, в пунктах Итоигава и Дзээтсу высота волн в 4-м сценарии – не более метра, а в 1, 2, 3-м сценарии она составляет 1–1,5 м. На рис. 9, *c* можно заметить, что высоты волн в сценарии 1 на побережьях районов Чюба и Кансай в среднем на 0,5 м меньше, чем в сценариях 3, 4. Это обусловлено тем, что первый блок в первом сценарии располагается внутри залива Тояма, а в остальных сценариях первый блок расположен в противоположной части п-ова Ното. На рис. 9, *c* видно, что высота волн в сценарии 1 больше, чем в остальных сценариях, вблизи зал. Тояма (до 38° с. ш.), а севернее залива преобладают высоты волн из 4-го сценария. Это также обусловлено расположением блоков, поскольку волны с наибольшими высотами из 1-го сценария распространяются из зал. Тояма, а волны из сценариев 2, 3, 4 огибают о. Садо и достигают северной части о. Хонсю с большими амплитудами. В табл. 3 приведены данные по всем проведенным сценариям (сценарии 1–4) и натурные данные с мареографных станций ⁵.

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Максимальный подъем (см) уровня моря вблизи населенных пунктов, расположенных на побережьях расчетной акватории
Sea level maximum rise (cm) near the settlements located on the estimated water area coast

Пункт / Settlement	Натурные данные ⁵ / Field data ⁵	Сценарий / Scenario			
		1	2	3	4
Saigo	27,1	34,2	24,0	20,1	21,9
Mikuni	31,5	68,7	45,1	28,6	30,2
Toyama	79,4	124,8	81,8	78,6	85,0
Kashiwa-zaki	40,2	121,3	71,2	53,5	65,4
Sado	32,0	37,2	20,1	31,4	24,6
Oga	27,4	62,3	26,0	31,2	31,4
Fukauro	33,9	25,2	10,0	23,4	28,5
Vladivastok	28,0	34,0	18,4	29,5	27,8
Hakodate	9,9	2,6	1,5	3,9	3,3
Wakkanai	8,5	2,8	1,8	5,7	7,5
Sosunovo	11,4	7,1	3,5	7,6	10,7
Kholmsk	12,0	1,2	1,0	3,5	4,1

Обсуждение результатов

Целью данной работы было получение волновых характеристик в акватории Японского моря на основе моделирования, для чего были рассмотрены 14 сценариев, из которых в данной работе приведены 4 с наилучшими волновыми характеристиками процесса. В ходе исследования были проанализированы

имеющиеся публикации по данному землетрясению [6–9]. Сравнение полученных нами результатов с данными из этих публикаций, наиболее детально – с данными работ [6, 7] (табл. 4), выполненных для модельных очагов землетрясения, локализация которых близка к предложенной в нашей работе, показывает, что данные нашего численного моделирования в основном близки, с точностью до погрешности в 5–6 см, к мареографным данным на соответствующих станциях. Там же, где есть существенное различие между амплитудой цунами и расчетной высотой, оно может быть объяснено сложными физическими процессами в заливе Тояма, такими как переотражение, краевые волны, резонансные явления в заливе [6–9].

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

Максимальный подъем уровня моря вблизи населенных пунктов, расположенных на побережьях расчетной акватории, в разных источниках
Sea level maximum rise (cm) near the settlements located on the estimated water area coast (data from different sources)

Пункт / Settlement	Натурные данные [7] / Field data [7]	Сценарий 4 / Scenario 4	Данные работы [6] / Data from [6]
Saigo	27,1	21,9	22
Mikuni	31,5	30,2	40
Toyama	79,4	85,0	75
Kashiwazaki	40,2	65,4	60
Sado	32,0	24,6	10
Oga	27,4	31,4	18
Fukaura	33,9	28,5	19
Vladivastok	28,0	27,8	5
Hakodate	9,9	3,3	–
Wakkanai	8,5	7,5	6
Sosunovo	11,4	10,7	3
Kholmsk	12,0	4,1	3

Так, например, на ст. Касивазаки все модели, как наши, так и используемые в работах [6, 7], переоценивают амплитуду цунами (от 89,4 до 227,1 см). По нашим расчетам, при изменении локализации и динамики очага землетрясения разброс в данном пункте составил от 53,5 до 121,3 см. Однако сценарий 4, выбранный нами как наиболее адекватный, в этом пункте дал расчетное значение 65,4 см, что также превысило наблюдаемую максимальную амплитуду в данном пункте.

В районе ст. Тояма максимальная амплитуда, по данным наблюдений, составила 79,4 см, а по сценарию 4 мы получили максимальное смещение волны 85,0 см, т. е. разница в 5,6 см. В работе [7] максимальная амплитуда, по данным моделирования, для данного пункта составила 79,4 см, а в работе [6] – 75 см.

То есть разница между расчетными и натурными данными в работах [6, 7] составила 4,4 и 4,2 см соответственно, т. е. на 1,2 и 1,4 см меньше, чем соответствующие наши данные. И хотя различия как в расчетах из работ [6, 7], так и в наших находятся, на наш взгляд, в рамках ошибки моделирования источника, в работе [6] сделано предположение, что такое различие возможно при существовании дополнительного к сейсмическому оползневого источника, это подтверждается результатами моделирования, проведенного авторами работы. Данные в остальных пунктах, за исключением Вакканай и Холмска, в нашем расчете имеют достаточно близкие к наблюдаемым амплитудам значения. Так, например, максимальная амплитуда волны во Владивостоке 28 см, а расчетные значения – 27,8 см. В пос. Сосуново эти значения составляют 11,4 и 10,7 см соответственно, а их разница 0,7 см.

Заключение

Приведенные в данной работе расчеты с использованием блочно-клавишной модели землетрясения показали, что для землетрясения, произошедшего в Японском море 01.01.2024 г., особенно важным является учет геоморфологии морского дна и геодинамики тектонических процессов. Данная модель позволяет учитывать начальное распределение напряжений в зоне подготовки землетрясения, а также динамический переходной процесс формирования распределения смещений морского дна. Были рассмотрены очаги землетрясения различной локализации с различной формой составляющих его блоков. Наиболее удачной для моделирования внутриплитового активного разлома оказалась форма очага с длинным треугольным блоком на северо-западе о. Нота. Результаты численного моделирования показали, что с помощью клавишной модели землетрясения возможно адекватно моделировать даже такие сложные очаги землетрясения, как произошедшее на северо-западе о. Нота. Сравнение полученных нами данных расчетов с амплитудой максимальной высоты волны цунами с мареографных станций, за исключением трех пунктов, дало погрешность меньше 6 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Holzer T. L.* The 1995 Hanshin-Awaj (Kobe), Japan, Earthquake // *GSA Today: A publication of the Geological Society of America.* 1995. Vol. 5, no. 8. P. 154–167. URL: <https://rock.geosociety.org/gsatoday/archive/5/8/pdf/i1052-5173-5-8-sci.pdf> (дата обращения: 28.09.2024).
2. Comparative numerical simulation of the Tohoku 2011 tsunami / N. A. Baranova [et al.] // *Science of Tsunami Hazards.* 2015. Vol. 34, iss. 4. P. 212–230.
3. Modeling features of both the rupture process and the local tsunami wave field from the 2011 Tohoku Earthquake / L. Lobkovsky [et al.] // *Pure and Applied Geophysics.* 2017. Vol. 174. P. 3919–3938. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1539-5>
4. The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries / M. Simons [et al.] // *Science.* 2011. Vol. 332, iss. 6036. P. 1421–1425. <https://doi.org/10.1126/science.1206731>
5. *Лобковский Л. И., Баранов Б. В.* Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // *Доклады АН СССР.* 1984. Т. 275, № 4. С. 843–847.

6. Modeling the 2024 Noto Peninsula earthquake tsunami: implications for tsunami sources in the eastern margin of the Japan Sea / H. Masuda [et al.] // *Geoscience Letters*. 2024. Vol. 11. 29. <https://doi.org/10.1186/s40562-024-00344-8>
7. *Fujii Y., Satake K.* Slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake (M_{JMA} 7.6) estimated from tsunami waveforms and GNSS data // *Earth, Planets and Space*. 2024. Vol. 76. 44. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01991-z>
8. Dataset of post-event survey of the 2024 Noto Peninsula earthquake tsunami in Japan / M. Yuhi [et al.] // *Scientific Data*. 2024. Vol. 11. 786. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03619-z>
9. Potential for tsunami detection via CCTV cameras in northeastern Toyama Prefecture, Japan, following the 2024 Noto Peninsula earthquake / T. Shirai [et al.] // *Geoscience Letters*. 2024. Vol. 11. 28. <https://doi.org/10.1186/s40562-024-00343-9>
10. *Wells D. L., Coppersmith K. J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. Vol. 84, no. 4. P. 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
11. *Sielecki A., Wurtele M.* The numerical integration of the nonlinear shallow-water equations with sloping boundaries // *Journal of Computational Physics*. 1970. Vol. 6, iss. 2. P. 219–236. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(70\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0021-9991(70)90022-7)

Об авторах:

Мазова Раиса Хаимовна, профессор кафедры «Прикладная математика», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0003-2443-149X**, **Scopus Author ID: 6506297372**, raissamazova@yandex.ru

Мартыненко Александр Анатольевич, магистрант, Автономная некоммерческая организация высшего образования «Центральный университет» (123056, Россия, г. Москва, ул. Гашека, д. 7, стр. 1), martynenko.busy@gmail.com

Куркин Андрей Александрович, проректор по научной работе, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24), ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН.», доктор физико-математических наук, профессор РАН, **SPIN-код: 1390-3940**, **ORCID ID: 0000-0003-3828-6406**, **Scopus Author ID: 7003446660**, **ResearcherID: A-1972-2014**, aakurkin@gmail.com