

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

О влиянии выбора нодальной плоскости на оценку энергии цунамиМ. А. Носов,^{1,2,а} С. В. Колесов,^{1,2,б} А. В. Большакова,^{1,в} Г. Н. Нурисламова^{1,2}¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*² *Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН. Россия, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б.*

Поступила в редакцию 11.05.2020, после доработки 23.05.2020, принята к публикации 18.06.2020.

С использованием данных о механизмах очагов землетрясений бюллетеня Международного сейсмологического центра (ISC) исследовано влияние выбора нодальной плоскости на оценку потенциальной энергии начального возвышения в очаге цунами. Показано, что для большинства сейсмических событий оценка энергии слабо зависит от выбора нодальной плоскости. Но в отдельных редких случаях оценки энергии могут различаться значительно — до одного порядка. Как правило, такие значительные различия свойственны сильным мелкофокусным землетрясениям, т. е. именно тем сейсмическим событиям, которые способны эффективно возбуждать волны цунами. Установлено, что во всех случаях, когда отношение длины площадки разрыва к глубине очага невелико, выбор нодальной плоскости практически не влияет на оценку энергии.

Ключевые слова: землетрясение, механизм очага землетрясения, нодальная плоскость, генерация цунами, энергия цунами.

УДК: 551.466.62. PACS: 91.30.Nw.

ВВЕДЕНИЕ

С момента возникновения первых систем предупреждения о цунами (СПЦ) и по настоящее время оперативный прогноз цунами базируется на сейсмических данных и предустановленных критериях (магнитудно-географический критерий) [1–5]. Решение об объявлении тревоги цунами принимается, если магнитуда сейсмического события превышает некоторое пороговое для региона значение. В зарубежных регламентах [4], кроме того, явно учитывается глубина землетрясения. Анализ практики применения магнитудно-географического критерия, проведенный на примере работы российской СПЦ [3], говорит о том, что эффективность этого критерия далека от совершенства, в частности в силу значительного числа ложных тревог.

Неэффективность магнитудно-географического критерия имеет под собой фундаментальные причины. Связь между волной цунами и породившим ее землетрясением является весьма сложной, и магнитуда оказывается пусть важным, но далеко не единственным фактором, определяющим силу цунами. Известно, что зависимость интенсивности цунами по шкале Соловьева—Имамуры от моментной магнитуды землетрясения характеризуется очень большим разбросом [6, 7]. При фиксированной магнитуде (например, $M_W = 8$) интенсивность цунами варьируется в пределах 6 единиц. Это означает, что средние высоты заплеска волн могут отличаться в 64 раза. Наличие столь большого разброса обязано различиям в механизмах очагов землетрясений и их глубинах, особенностям топографии дна и затопляемого участка берега. Увеличению разброса также способствует возможный вклад в энергию цунами

вторичных источников — оползней и обвалов, провоцируемых землетрясением [6, 8, 9].

Одна из возможностей повышения точности оперативного прогноза цунами сопряжена с учетом механизма очага землетрясения и его глубины. В январе 2018 г. нами была запущена в тестовую эксплуатацию автоматическая система Tsunami Observer, которая реализует означенную возможность [10, 11]. В качестве меры цунамигенности землетрясения в системе Tsunami Observer используется оценка потенциальной энергии начального возвышения водной поверхности в очаге цунами (энергия цунами).

Важной особенностью данных о механизме очага землетрясения является существование двух равнозначных решений, определяющих ориентацию площадки разрыва и направления подвижки. Речь идет о двух нодальных плоскостях, выбор в пользу одной из которых, особенно в оперативном режиме, является нетривиальной задачей или не представляется возможным. В такой ситуации при оценке цунамигенности землетрясения необходимо проводить две серии расчетов с последующим выбором наиболее опасного сценария. Удвоение объема вычислений, которые должны быть произведены в оперативном режиме, очевидно, нежелательно.

Основной целью настоящей работы является исследование того, как сильно влияет выбор нодальной плоскости на оценку потенциальной энергии начального возвышения в очаге цунами. Вторая цель — выявление условий, при которых выбор нодальной плоскости гарантированно слабо влияет на оценку энергии.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Необходимые для анализа параметры очагов землетрясений были заимствованы из бюллетеня Международного сейсмологического центра (Bulletin of the International Seismological Centre — ISC) [12–14].

^а E-mail: nosov@phys.msu.ru

^б E-mail: kolesov@ocean.phys.msu.ru

^в E-mail: annabolshakova@list.ru

В настоящее время в означенном источнике определения механизмов очагов землетрясений доступны с 1976 г. Мы использовали все доступные данные с авторством NEIC (National Earthquake Information Center) за период с 01.01.1976 по 01.04.2019 гг. Для большинства сейсмических событий в бюллетене присутствуют несколько вариантов решений. Во всех случаях выбиралось первое по порядку следования решение с меткой CENTROID=TRUE.

В силу того, что цунами вызываются только сильными землетрясениями, из бюллетеня были отобраны сейсмические события с моментной магнитудой $M_W \geq 6$. Полученная таким образом выборка, которую в дальнейшем для краткости будем называть «ISC6+», содержала 4630 землетрясений.

Для каждого сейсмического события из выборки ISC6+ последовательно выполнялись четыре этапа расчетов. Далее мы кратко охарактеризуем каждый из этих этапов. Подробное описание применяемых методик содержится в работах [10, 11].

На *первом этапе* по формулам Окада [15] рассчитывалось векторное поле косейсмической деформации дна/суши $u = (u_x, u_y, u_z)$. При расчетах предполагалось, что центр прямоугольной площадки разрыва соответствует координатам сейсмического источника, указанным в бюллетене ISC (долгота, широта, глубина). Ориентация площадки разрыва в пространстве (углы Strike и Dip) и направление подвижки (угол Rake) также брались непосредственно из бюллетеня ISC. Рассматривались два набора углов (Strike, Dip, Rake), соответствующие нодальным плоскостям NP1 и NP2. Длина L и ширина W площадки разрыва, а также величина подвижки U вычислялись по указанному в бюллетене сейсмическому моменту M_0 с использованием эмпирических формул, которые были предложены в работе [16]:

$$\begin{aligned} L[\text{м}] &= 6.53 \cdot 10^{-4} M_0^{2/5}, \\ W[\text{м}] &= 1.32 \cdot 10^{-1} M_0^{4/15}, \\ U[\text{м}] &= 3.52 \cdot 10^{-7} M_0^{1/3}. \end{aligned} \quad (1)$$

На *втором этапе* по векторному полю косейсмических деформаций с использованием цифровой модели рельефа Земли (GEBCO) рассчитывалось остаточное смещение поверхности дна/суши η [17, 18]. При этом учитывался вклад как вертикальной, так и горизонтальной компоненты косейсмической деформации

$$\eta = \frac{\partial H}{\partial x} u_x + \frac{\partial H}{\partial y} u_y + u_z, \quad (2)$$

где H — глубина океана. Частные производные в формуле (2) вычисляются в локальной прямоугольной системе координат $Oxyz$, в которой оси Ox и Oy горизонтальны, а ось Oz вертикальна. Заметим, что в ряде случаев вклад горизонтальных смещений подводных склонов в энергию цунами оказывается весьма значительным: он может достигать нескольких десятков процентов [19].

На *третьем этапе* функция η сглаживалась путем применения взвешенного скользящего среднего с весовой функцией, зависящей от глубины океана [10]. В итоге получалось начальное возвышение

водной поверхности в очаге цунами ξ с учетом сглаживающего эффекта водного слоя [20–26]. На суше начальное возвышение приравнивалось нулю.

На заключительном *четвертом этапе* по начальному возвышению водной поверхности ξ рассчитывалась потенциальная энергия

$$E = \frac{\rho g}{2} \iint \xi^2 dx dy$$

где ρ — плотность воды, g — ускорение свободного падения. В расчетах использовались следующие значения: $\rho = 1030 \text{ кг/м}^3$, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$.

Все расчеты проводились средствами системы Tsunami Observer, что позволило существенно упростить и ускорить вычисления за счет автоматизации рутинных процедур. Для каждого сейсмического события из выборки ISC6+ выполнялись два варианта расчета, соответствующие двум нодальным плоскостям. В частности, рассчитывались два значения энергии начального возвышения: E_{NP1} и E_{NP2} .

В штатном режиме работы системы Tsunami Observer землетрясение считается заведомо нецунамигенным при условии $E < E_{\min}$, где $E_{\min} = 10^9 \text{ Дж}$. Указанное пороговое значение E_{\min} приблизительно соответствует характерному значению энергии начального возвышения, формируемого в результате землетрясения с магнитудой $M_W = 6$ [7, 19]. В настоящей работе мы исключали из рассмотрения те события, для которых оба значения энергии оказывались меньше порогового значения: $E_{NP1} < E_{\min}$ и $E_{NP2} < E_{\min}$. В итоге из выборки ISC6+ было исключено около 65% сейсмических событий. Как правило, эпицентры исключенных событий были расположены на суше. Кроме того, исключенными оказались многие глубокофокусные землетрясения либо землетрясения, механизм которых не способствует эффективному вытеснению воды (например, Strike-slip). Итоговая выборка — назовем ее «ISC-TS» — содержала 1640 «цунамигенных» землетрясений. Все описываемые далее результаты получены в результате анализа выборки ISC-TS.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 сопоставляются начальные возвышения водной поверхности в очаге цунами, рассчитанные по данным NP1 (сплошные линии) и NP2 (пунктир). На рисунке показаны несколько типичных примеров. Видно, что в ряде случаев (*a, б*) форма и положение начального возвышения, а также величина энергии практически не зависят от выбора нодальной плоскости. В других случаях (*в, г*) заметно различаются форма и положение начальных возвышений, но при этом величины E_{NP1} и E_{NP2} оказываются близкими. Встречаются также случаи (*д, е*), когда и форма, и положение, и величины энергий E_{NP1} и E_{NP2} различаются значительно.

На рис. 2 представлена зависимость энергии E_{NP1} от E_{NP2} . Данные представлены цветными кружками, цвет и размер которых меняются в зависимости от глубины землетрясения и величины моментной магнитуды в соответствии со шкалами, показанными на рисунке. Из рис. 2 можно заключить, что энергия

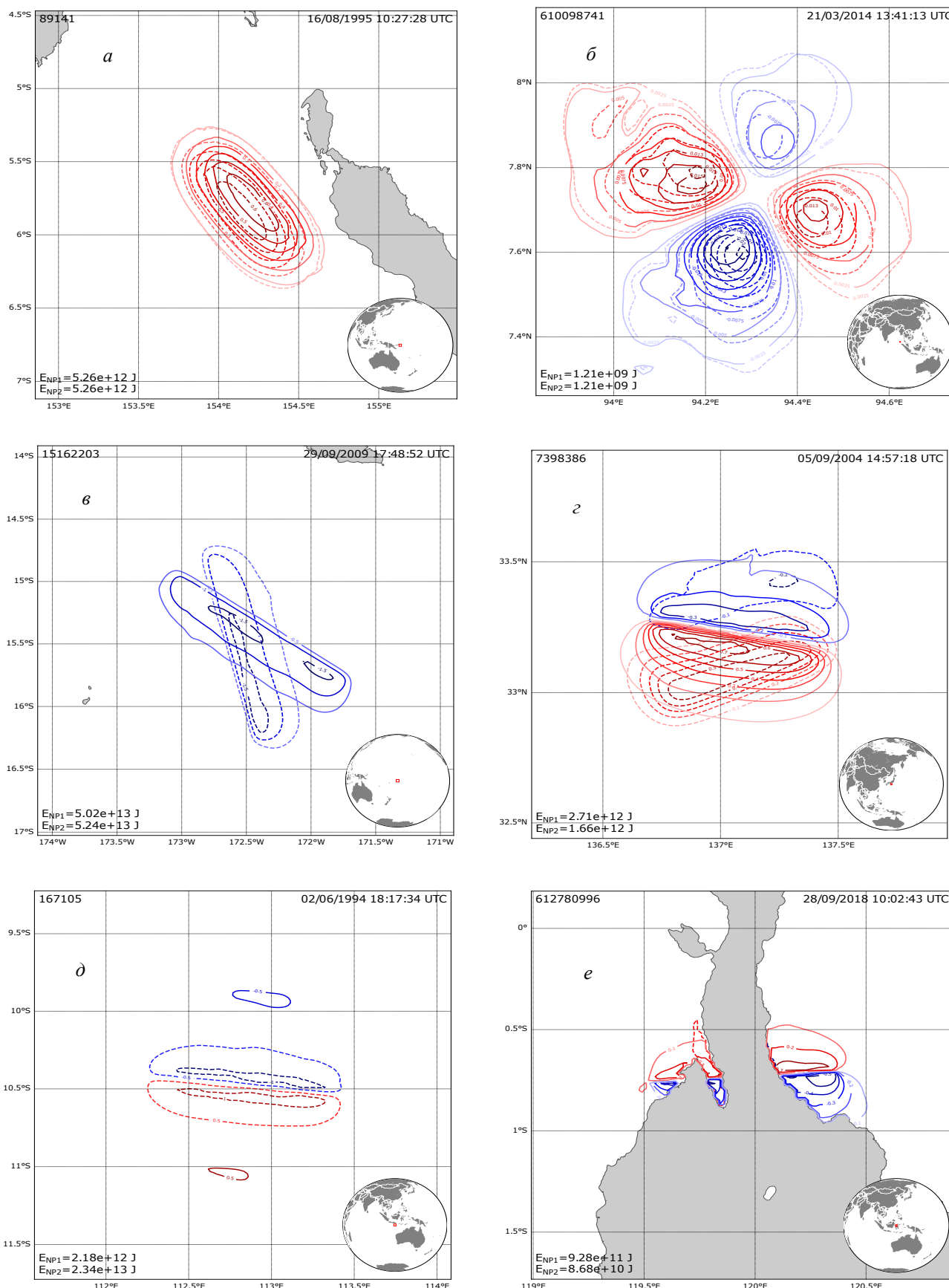


Рис. 1. Примеры расчета начального возвышения поверхности воды в очаге цунами с использованием данных по различным нодальным плоскостям: NP1 (сплошные линии), NP2 (пунктир). Красные линии — поднятие, синие — опускание. Цифры у изолиний — величина отклонения поверхности воды в метрах. В левом верхнем углу указан код сейсмического события по бюллетеню ISC, в правом верхнем углу — дата и время землетрясения, в левом нижнем углу — величины энергий E_{NP1} и E_{NP2} в Дж

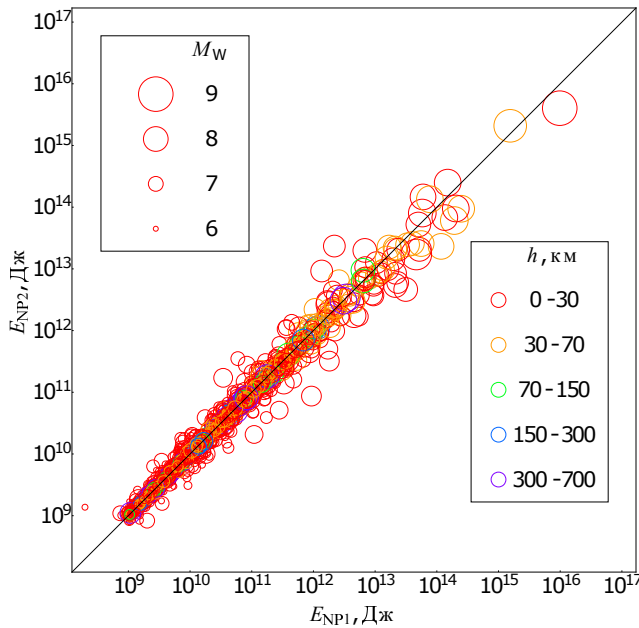


Рис. 2. Сопоставление энергий начального возвышения E_{NP1} и E_{NP2} , рассчитанных с использованием данных по различным нодальным плоскостям. Цвет и размер кружков варьируются в зависимости от глубины и магнитуды землетрясения в соответствии со шкалами, представленными на рисунке. Черной линией показана зависимость $E_{NP1} = E_{NP2}$

начального возвышения варьируется в диапазоне 8 порядков: от $\sim 10^8$ Дж до $\sim 10^{16}$ Дж. Максимальные энергии соответствуют сильным мелкофокусным землетрясениям, минимальные — слабым и/или глубокофокусным событиям. Подавляющее большинство точек сосредоточено вблизи прямой $E_{NP1} = E_{NP2}$, что говорит о близости значений энергии, рассчитываемых для одного события, но, по данным, соответствующим различным нодальным плоскостям.

Более детальное представление о том, как сильно выбор нодальной плоскости влияет на величину энергии начального возвышения, можно получить, анализируя распределение числа событий по отношению энергий E_{NP1}/E_{NP2} . Это распределение, построенное в двойном логарифмическом масшта-

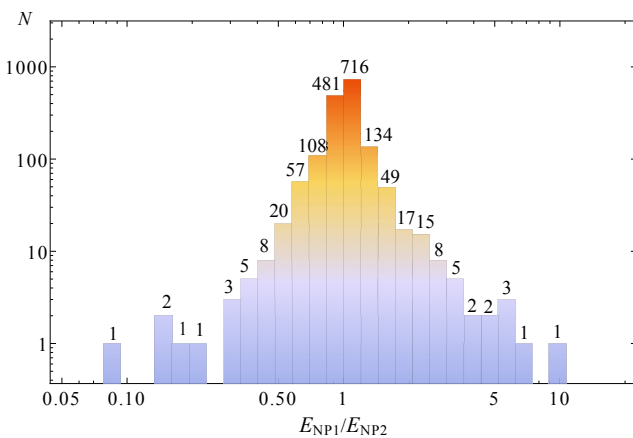


Рис. 3. Распределение числа событий по отношению энергий E_{NP1}/E_{NP2} . Цифры над столбиками показывают число событий, попадающих в соответствующий интервал

бе, представлено на рис. 3. Величина E_{NP1}/E_{NP2} варьируется с шагом 1.2 раза. Из рис. 3 видно, что величины E_{NP1} и E_{NP2} могут отличаться друг от друга не более чем на один порядок. Причем различия на порядок имеют место крайне редко — в единичных случаях. Различия энергий E_{NP1} и E_{NP2} более чем в 5 раз свойственны всего 0.6% случаев, более чем в 2 раза — 3.7% случаев, более чем в 1.2 раза — 27% случаев.

На первый взгляд, можно было бы ограничиться выводом, что для подавляющего большинства сейсмических событий выбор нодальной плоскости не оказывает существенного влияния на оценку потенциальной энергии начального возвышения. Но пренебрегать редкими или даже единичными случаями, когда различия между величинами E_{NP1} и E_{NP2} оказываются значительными, не следует. Дело в том, что максимальные различия могут быть присущи сильным мелкофокусным землетрясениям, т.е. именно тем землетрясениям, которые способны вызывать цунами высокой интенсивности. Причина этого имеет простую «геометрическую» природу: косейсмические деформации слабо зависят от выбора нодальной плоскости в тех случаях, когда источник можно считать «точечным», т.е. когда размер площадки разрыва существенно меньше глубины землетрясения. Очевидно, что очаги сильных мелкофокусных землетрясений никак не попадают в разряд «точечных».

Для определенности в качестве размера площадки разрыва будем рассматривать ее длину L . Величина L связана с сейсмическим моментом эмпирической зависимостью (1). Введем безразмерный

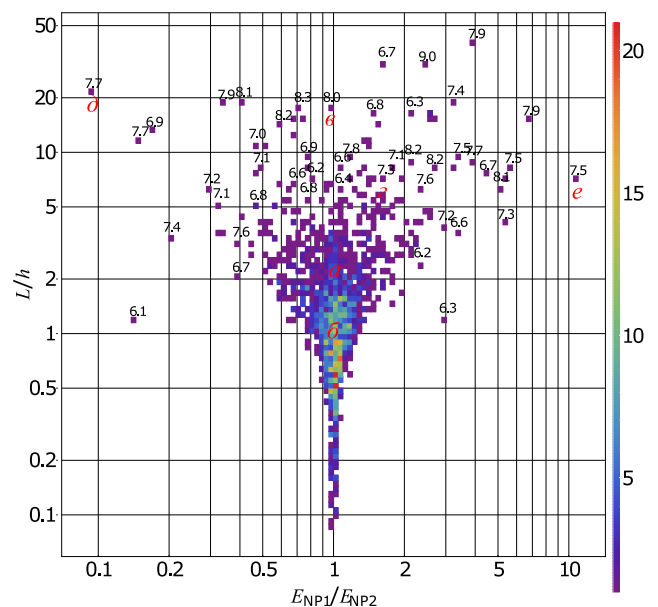


Рис. 4. Распределение числа событий по отношению энергий E_{NP1}/E_{NP2} и отношению длины площадки разрыва к глубине очага землетрясения L/h . Число событий показано в соответствии с цветовой шкалой (справа на рисунке), цифры у шкалы — число событий, попадающих в соответствующий интервал. На распределении, над некоторыми отдельно стоящими событиями, указана величина моментной магнитуды землетрясения. Красными литерами отмечены шесть событий, которые представлены на рис. 1

параметр — отношение длины площадки разрыва к глубине очага землетрясения: L/h . На рис. 4 представлено распределение числа событий по двум величинам: E_{NP1}/E_{NP2} и L/h . Красными литерами на рис. 4 отмечены те шесть примеров расчета начальных возвышений, которые представлены на рис. 1. Над некоторыми элементами распределения, теми, которые соответствуют одиночным событиям, указана величина моментной магнитуды. Несложно заметить, что никакой явной зависимости отношения E_{NP1}/E_{NP2} от магнитуды не прослеживается. Но величина E_{NP1}/E_{NP2} существенным образом зависит от отношения L/h . При малых значениях параметра L/h распределение становится узким, т. е. отношение энергий стремится к единице.

Из анализа выборки ISC-TS и рис. 4 можно заключить, что при $L/h \leq 0.5$ (161 событие — 9.8% всех событий из выборки ISC-TS) энергии E_{NP1} и E_{NP2} отличаются менее чем в 1.1 раза. При $L/h \leq 1$ (611 событий — 37%) энергии отличаются менее чем в 1.3 раза. При $L/h \leq 2$ (1240 событий — 76%) для всех событий, кроме двух, энергии отличаются менее чем в 2 раза. Заметим, что выпадающие из общего правила два события характеризуются незначительными магнитудами (6.1, 6.3), поэтому с точки зрения оценки цунамиопасности ими можно пренебречь.

Заметим, что величины E_{NP1} и E_{NP2} представляют собой не точные значения энергии цунами, а приближенные оценки, полученные в предположении об аппроксимации очага землетрясения прямоугольной площадкой разрыва с равномерным распределением подвижки. В этой связи величины E_{NP1} и E_{NP2} можно полагать близкими, если они отличаются не более чем в 2 раза. Если двукратная точность является допустимой, то в 76% случаев можно проводить расчеты, основываясь на данных о любой из нодальных плоскостей. И только в 24% случаев, при четко определенном условии $L/h > 2$, расчеты придется проводить в два потока — по данным об обеих нодальных плоскостях, а затем выбирать наиболее опасный сценарий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием данных о механизмах очагов землетрясений бюллетеня Международного сейсмологического центра за период с 01.01.1976 по 01.04.2019 гг. исследовано влияние выбора нодальной плоскости на величину потенциальной энергии начального возвышения в очаге цунами. Показано, что энергии, рассчитанные для одного события по разным нодальным плоскостям (E_{NP1} и E_{NP2}), отличаются не более чем на один порядок. Различия на порядок имеют место крайне редко — в единичных случаях. Для большинства сейсмических событий выбор нодальной плоскости не оказывает существенного влияния на оценку потенциальной энергии. Энергии различаются более чем в 5 раз для 0.6% случаев, более чем в 2 раза — для 3.7% случаев, более чем в 1.2 раза — для 27% случаев.

Показано, что на различие энергий E_{NP1} и E_{NP2} оказывает существенное влияние отношение длины площадки разрыва к глубине очага землетрясения

L/h . При малых значениях параметра L/h энергии всегда отличаются незначительно. В этой связи для большинства (76%) сейсмических событий при выполнении условия $L/h \leq 2$ энергия начального возвышения может рассчитываться с использованием данных о любой из нодальных плоскостей.

Авторы признательны Международному сейсмологическому центру (the International Seismological Centre) за предоставленные данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 19-05-00351, 20-07-01098, 20-35-70038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев С. Л. Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С. 7.
2. Поплавский А. А., Поплавская Л. Н., Спиринов А. И. и др. // Вулканонология и сейсмология. 2009. № 1. С. 65.
3. Гусяков В. К. // Сейсмические приборы. 2010. **46**, № 3. С. 5.
4. Users Guide for the Pacific Tsunami Warning Center Enhanced Products for the Tsunami and other Coastal Hazards Warning System for the Caribbean and Adjacent Regions (CARIBE-EWS). IOC Technical Series No 135. UNESCO/IOC, 2017.
5. Чебров Д. В. // Вычислительные технологии. 2019. **24**, № 1. С. 120
6. Gusiakov V. K. // Pure and applied geophysics. 2011. **168**, N 11. 2033.
7. Levin B. W., Nosov M. A. Physics of Tsunamis. Second Edition. Springer, 2016.
8. Zaytsev A. I., Pelinovsky E. N., Yalciiner A. et al. // Dokl. Earth Sc. 2019. **486**. P. 588.
9. Heidarzadeh M., Muhari A., Wijanarto A. B. // Pure Appl. Geophys. 2019. **176**: 25.
10. Носов М. А., Колесов С. В., Большакова А. В. и др. // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2018. № 5. 1850901.
11. Носов М. А., Колесов С. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2019. № 6. С. 96. (Kolesov S. V., Nosov M. A. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2019. **74**, N 6. P. 679.)
12. Lentas K., Di Giacomo D., Harris J., Storchak D. A. // Earth Syst. Sci. Data, 2019. **11**. P. 565.
13. Lentas K. // Geophys. J. Int. 2018. **212**, N 3. P. 1665.
14. International Seismological Centre. 2019. On-line Bulletin
15. Okada Y. // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1985. **75**, N 4. P. 1135.
16. Leonard M. // Bull. Seism. Society of Amer. 2010. **100**, N 5A. P. 1971.
17. Tanioka Y., Satake K. // Geophys. Res. Lett. 1996. **23**, N 8. P. 861.
18. Nosov M. A., Bolshakova A. V., Kolesov S. V. // Pure and Appl. Geophys. 2014. **171**, N 12. P. 3515.
19. Большакова А. В., Носов М. А., Колесов С. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 1. С. 61. (Bolshakova A. V., Nosov M. A., Kolesov S. V. (Moscow Univ. Phys. Bull. 2015. **70**, N 1. P. 62.)
20. Kajiura K. // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1963, **41**, N 3. P. 535.
21. Tanioka Y., Seno T. // Geophys. Res. Lett. 2001. **28**, N 17. P. 3389.
22. Saito T., Furumura T. // Geophys. J. Int. 2009. **178**, N 2. P. 877.
23. Носов М. А., Колесов С. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 2. С. 96. (Nosov M. A., Kolesov S. V. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2009. **64**, N 2. P. 208.)

24. Файн И. В., Куликов Е. А. // Вычислительные технологии. 2011. **16**, № 2. С. 111.
25. Nosov M. A., Kolesov S. V. // Pure and applied geophysics. 2011. **168**, N 6–7. С. 1223.
26. Носов М. А., Семенцов К. А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. **50**, № 5. С. 612.

The Effect of the Choice of the Nodal Plane on Tsunami Energy Estimates

M. A. Nosov^{1,2,a}, S. V. Kolesov^{1,2,b}, A. V. Bolshakova¹, G. N. Nurislamova^{1,2,d}

¹Chair of Physics of Sea and Inland Water, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

²Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia.

E-mail: ^anosov@phys.msu.ru, ^bkolesov@ocean.phys.msu.ru, ^cannabolshakova@list.ru,

^dnurislamova@physics.msu.ru.

Data on earthquake focal mechanisms from the Bulletin of the International Seismological Center (ISC) have been used to study the effect of the choice of the nodal plane on the estimate for potential energy of the initial elevation in the tsunami source. For the majority of seismic events, the energy estimate has been shown to weakly depend on the choice of the nodal plane. However, in some rare cases, the energy estimates can differ significantly (by up to one order of magnitude). Usually, these significant differences are characteristic of strong shallow earthquakes, i. e., the seismic events that can effectively generate tsunami waves. In all cases when the ratio of the rupture length to the earthquake depth is small the choice of the nodal plane has almost no effect on the energy estimate.

Keywords: earthquake, earthquake focal mechanism, nodal plane, tsunami generation, tsunami energy.

PACS: 91.30.Nw.

Received 11 May 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 5. Pp. 501–506.

Сведения об авторах

1. Носов Михаил Александрович — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: nosov@phys.msu.ru.
2. Колесов Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: kolesov@ocean.phys.msu.ru.
3. Большакова Анна Владимировна — канд. физ.-мат. наук, вед. инженер; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: annabolshakova@list.ru.
4. Нурисламова Гульназ Нуровна — канд. физ.-мат. наук, спец. по учебно-методической работе; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: nurislamova@physics.msu.ru.