

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Опыт эксплуатации автоматической системы оценки цунамиопасности землетрясения «Tsunami Observer»С. В. Колесов,^{1,2, а} М. А. Носов^{1,2, б}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, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.*

Поступила в редакцию 19.07.2019, после доработки 16.09.2019, принята к публикации 19.09.2019.

С 25 января 2018 г. функционирует автоматическая система оценки цунамиопасности землетрясения «Tsunami Observer». В статье анализируются результаты работы системы за истекший полуторагодовой период, проводится сравнение оценок, формируемых системой, с данными натурных наблюдений. Обсуждается проблема оперативности появления информации о сейсмическом источнике, которая необходима для оценки цунамиопасности, приводится общая статистика по работе системы.

Ключевые слова: подводное землетрясение, цунами, косейсмическая деформация, длинные волны, численное моделирование.

УДК: 550.344.42. PACS: 91.30.Nw.

ВВЕДЕНИЕ

Волны цунами в большинстве случаев (около 80%) возникают в океанах и морях в результате сильных подводных землетрясений [1–5]. Для любой точки побережья между приходом сейсмических волн и приходом волн цунами всегда есть некоторый промежуток времени (от минут до первых десятков часов), поэтому цунами сейсмического происхождения относятся к прогнозируемым морским природным катастрофам. Совершенствование методов прогноза имеет важное значение для снижения числа жертв, уменьшения материального ущерба и планирования спасательных работ.

Согласно регламентам служб предупреждения о цунами (СПЦ), оперативный прогноз цунами производится на основе магнитудно-географического критерия [6–10]. Тревога цунами объявляется, если магнитуда сейсмического события превышает установленное для региона пороговое значение. В некоторых регламентах, кроме того, учитывается глубина землетрясения [8, 9].

Магнитудно-географический критерий далек от совершенства, о чем свидетельствует значительное число ложных тревог [7, 10]. Несовершенство критерия имеет под собой фундаментальные причины — связь между цунами и землетрясением является сложной и неоднозначной. Так, например, зависимость интенсивности цунами по шкале Соловьева—Имамуры от моментной магнитуды землетрясения демонстрирует колоссальный разброс данных. При заданной магнитуде интенсивность цунами может различаться в пределах 6 единиц, что говорит о неопределенности в средней высоте заплеска в 64 раза [5, 11]. Наличие столь большого разброса вызвано различиями в механизме очага землетря-

сения, его глубине, продолжительности подвижки, глубине океана в эпицентральной области, особенностям топографии дна и затопляемого участка берега, а также возможному вкладу в цунами подводных оползней.

Один из возможных подходов к повышению точности оперативного прогноза цунами сопряжен с учетом механизма очага землетрясения и его глубины. Для проверки работоспособности означенного подхода авторами была создана автоматическая система «Tsunami Observer» (<http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer>). Система введена в эксплуатацию в январе 2018 года, и с тех пор она в постоянном режиме осуществляет мониторинг происходящих землетрясений и производит оценку их цунамиопасности. Архитектура и принципы действия системы «Tsunami Observer» подробно представлены в статье [12], здесь мы ограничимся только кратким описанием.

Система «Tsunami Observer» каждые 5 минут опрашивает два источника сейсмических данных: RSS-ленту информации о землетрясениях Геологической службы США (USGS) и каталог механизмов системы GEOFON Германского центра исследования Земли (GFZ). На первом этапе, при появлении данных о вновь произошедшем землетрясении с магнитудой $M_w \geq 6$ (координаты, глубина, механизм очага, моментная магнитуда или сейсмический момент), запускается расчет векторного поля косейсмических деформаций дна и/или суши. В этом расчете используются формулы Окады [13] и эмпирические зависимости, которые связывают параметры прямоугольной площадки разрыва с моментной магнитудой [14]. По векторному полю косейсмических деформаций с учетом глобальной цифровой модели рельефа GEBCO (The GEBCO_2014 Grid, <http://www.gebco.net>) вычисляется косейсмическая деформация поверхности дна и/или суши. Вклад горизонтальных и вертикальных компонент косейс-

^а E-mail: kolesov@ocean.phys.msu.ru

^б E-mail: nosov@phys.msu.ru

Табл. 1. Характеристики цунами-событий

№	Дата	Место	Магнитуда землетрясения, M_w	Максимальная зарегистрированная высота заплеска, м	Оценки, сформированные системой «Tsunami Observer»			
					Интенсивность цунами по шкале Соловьева—Имамуры		Максимальная высота волн по данным гидродинамического моделирования, м	
					USGS	GEOFON	USGS	GEOFON
1	04.05.2018	Гавайские о-ва	6.9	0.4	-1.5	-1.6	0.4	0.5
2	05.08.2018	о. Бали	6.9	0.14	-1.6	-1.6	0.19	0.3
3	29.08.2018	Новая Каледония	7.1	0.27	-1.2	-1.3	0.37	0.24
4	28.09.2018	Палу, о. Сулавеси	7.5	10.67	-1.3	-1.6	0.43	0.15
5	25.10.2018	Ионическое море	6.8	0.5	-1.7	-1.6	0.17	0.58
6	05.12.2018	Новая Каледония	7.5	2	-0.3	-0.3	2.98	3.21
7	14.06.2019	Чили	6.4	0.07	-1.8	-1.8	0.1	0.12
8	15.06.2019	арх. Кермадек	7.2	0.14	-1.2	-0.9	0.27	0.37
9	18.06.2019	Ниигата, Япония	6.4	0.1	-1.8	-1.8	0.11	0.05

мической деформации с учетом рельефа рассчитывается в соответствии с методикой, описанной в работах [15, 16]. На втором этапе косейсмическая деформация поверхности дна и/или суши пересчитывается в начальное возвышение водной поверхности в очаге цунами, при этом для морских точек учитывается сглаживающий эффект водного слоя [17–19], а точки, расположенные на суше, исключаются из рассмотрения. По начальному возвышению определяется потенциальная энергия этого возвышения — энергии цунами. На данном этапе автоматически исключаются события, произошедшие на суше, т. к. потенциальная энергия начального возвышения для таких событий мала или вовсе нулевая. На третьем этапе оценивается интенсивность цунами по шкале Соловьева—Имамуры ($I = 0.5 + \log_2 A$, где A — средняя высота заплеска на ближайшем побережье). Для этого используется эмпирическая связь энергии начального возвышения и интенсивности цунами, полученная в результате анализа исторических событий, для которых известны как механизм очага землетрясения (Global Centroid Moment Tensor database, Columbia University & Harvard University), так и значения интенсивности цунами [20, 21]. Если оценка энергии цунами превышает заданное пороговое значение ($E \geq 10^9$ Дж), то инициируется четвертый этап — гидродинамическое численное моделирование цунами, что позволяет выявить пространственное распределение амплитуды волн, определить направления распространения волновой энергии и уточнить максимальную высоту цунами. Численная модель построена в рамках теории длинных волн, ее описание можно найти в нашей статье [22].

Результатом работы системы «Tsunami Observer» являются: (1) расчет косейсмической деформации поверхности дна/суши, (2) расчет начального возвышения водной поверхности в очаге цунами, (3) оценка потенциальной энергии начального возвышения, (4) оценка интенсивности цунами по шкале Соловьева—Имамуры, (5) расчет распределения амплитуды волн и (6) оценка максимальной высоты волн. Необходимо уточнить, что значение максимальной высоты

волн по результатам гидродинамического моделирования система вычисляет по всей расчетной области. В большинстве случаев максимальные высоты достигаются именно на береговой линии, но в отдельных случаях из этого правила бывают исключения.

Цель настоящей работы состоит в анализе полуторогодичного опыта эксплуатации системы «Tsunami Observer» и предварительной оценке работоспособности и надежности применяемых методик.

1. ЦУНАМИ-СОБЫТИЯ, ПРОИЗОШЕДШИЕ ЗА ПЕРИОД ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Система «Tsunami Observer» начала функционировать 25 января 2018 г. На момент написания статьи (июль 2019 г.) произошло около 200 землетрясений с моментной магнитудой свыше 6, которые инициировали работу системы. Но только 9 из этих 200 сейсмических событий имели подтвержденное проявление в виде волн цунами, с зарегистрированными высотами заплеска. Здесь и далее фактическая информация о цунами приводится в соответствии с Global Historical Tsunami Database (NOAA) [21]. Список цунами-событий представлен в табл. 1. Далее рассмотрим реакцию системы на каждое из 9 землетрясений, вызвавших цунами.

Цунами 04.05.2018 на Гавайских островах образовалось в результате землетрясения с моментной магнитудой 6.9. На рис. 1 представлены результаты расчетов в том виде, в котором они выдаются системой «Tsunami Observer». Подробнее с результатами расчетов можно ознакомиться по интернет-ссылкам [23, 24]. На рис. 1, а показаны деформации поверхности дна и суши по данным USGS (слева) и GEOFON (справа). Видно, что координаты очага землетрясения заметно различаются. Также заметно отличаются и величины максимальных деформаций: 0.39 м, по данным USGS, и 0.51 м, по данным GEOFON. Отличия в позиционировании очага землетрясения приводят к существенной разнице в форме начального возвышения воды в очаге цунами (рис. 1, б). Оценки интенсивности возможного цунами, сформированные системой, составили –1.5 (USGS) и –1.6 (GEOFON), что эквивалентно

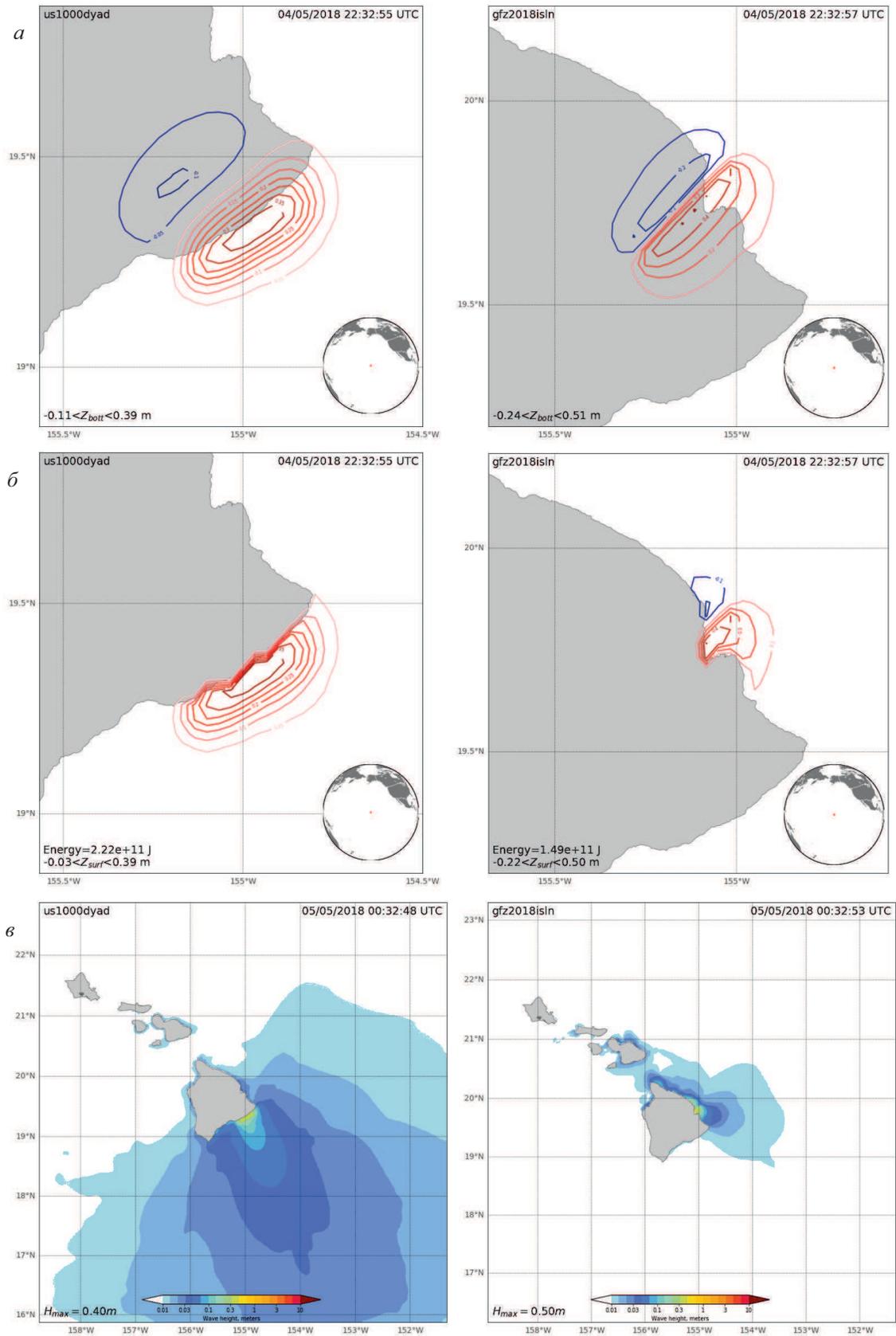


Рис. 1. Цунами 04.05.2018 на Гавайских островах. Деформации поверхности дна и суши (а), начальное возвышения воды в очаге цунами (б) и распределение максимальной амплитуды волн (в), рассчитанные по данным USGS (слева) и GEOFON (справа)

средней высоте заплеска на ближайшем побережье 0.25 м и 0.23 м соответственно. Гидродинамическое моделирование дало оценку максимальной амплитуды цунами 0.4 м для очага, рассчитанного по данным USGS, и 0.5 м для очага, рассчитанного по данным GEOFON (рис. 1, *в*). Зарегистрированная максимальная высота волн цунами 04.05.2018 на Гавайских островах составила 0.4 м (см. табл. 1). В рассматриваемом случае результат работы системы можно признать вполне удовлетворительным — оценки неплохо соответствуют данным наблюдений.

Цунами 5.08.2018 на о. Бали [25, 26] было вызвано землетрясением магнитудой 6.9. Высоты заплесков достигали 0.14 м. Результат работы системы представлен на рис. 2. Из рисунка видно, что в данном случае оба источника сейсмических данных дают сходные параметры по положению и механизму очага, но оценка амплитуды деформации дна, по данным GEOFON, почти в 2 раза превышает соответствующую оценку по данным USGS: 0.31 м и 0.17 м соответственно. Это закономерно приводит к разнице в высотах смещения воды в очаге цунами и в высоте волн вблизи о. Бали. Незначительная разница в расположении источника по отношению к береговой линии привела к тому, что, несмотря на различия в амплитуде косейсмической деформации по данным USGS и GEOFON, получилась одинаковая оценка интенсивности цунами, -1.6 (соответствует средней высоте заплеска 0.23 м). Максимальные высоты волн цунами, полученные по результатам гидродинамического моделирования, составили 0.19 м (USGS) и 0.3 м (GEOFON). Результат работы системы можно признать удовлетворительно соответствующим натурным данным. Некоторое завышение амплитуды волн в данном случае, очевидно, не является критическим.

29.08.2018 в Новой Каледонии после землетрясения магнитудой 7.1 произошло цунами с высотами заплеска на ближайших островах до 0.27 м [27, 28]. Источник цунами находился в глубоководной области на значительном удалении от суши. Оценки интенсивности цунами, сформированные системой для этого события, составили -1.2 (USGS) и -1.3 (GEOFON), что соответствует средним высотам заплеска 0.31 м и 0.29 м. Численное моделирование показало значение максимальных высот волн 0.37 м (USGS) и 0.24 м (GEOFON). Можно заключить, что оценки, сформированные системой, неплохо соответствуют фактическим данным.

Землетрясение магнитудой 7.5 и последовавшее за ним **цунами 28.09.2018 на о. Сулавеси (г. Палу)** [29, 30] выделяется среди прочих событий рассматриваемого периода времени. Проявления этого цунами носили катастрофический характер. Высоты заплеска достигали 10.67 м, погибло 2256 человек, разрушено около 6000 строений [21]. Система оценила интенсивность возможного цунами в -1.3 (USGS) и -1.6 (GEOFON), что эквивалентно средним высотам заплеска 0.29 м и 0.23 м. Гидродинамическое моделирование дало оценки максимальной амплитуды 0.43 м (USGS) и 0.15 м (GEOFON). Примечательно, что в данном случае расчет цунами с использованием более точного источника, восстановленного по

данным о распределении подвижки в очаге землетрясения (Finite Fault Model, USGS), также не позволил воспроизвести наблюдаемые заплески (максимальная высота волн до 2 м). Причина такой существенной недооценки системой высот заплеска скорее всего обязана тому, что существенный вклад в энергию цунами внесли оползни, вызванные землетрясением [31, 32]. Заметим, что в соответствии с Global Historical Tsunami Database (NOAA) [21] в качестве причины образования цунами 28.09.2018 г. на о. Сулавеси отмечены как землетрясение, так и оползень. Оценка цунамиопасности событий такого рода, очевидно, находится за рамками возможностей системы «Tsunami Observer».

25.10.2018 произошло **цунами в Ионическом море** у берегов Греции южнее о. Закинф [33, 34]. Магнитуда землетрясения составила 6.8, высоты заплеска цунами достигали 0.5 м. Результат работы системы представлен на рис. 3. Надо отметить, что косейсмические деформации дна, рассчитанные по данным двух используемых механизмов очага, заметно различаются как по пространственной картине, так и по амплитуде: 0.11 м (USGS) и 0.23 м (GEOFON). Интенсивность цунами была оценена системой как -1.7 (USGS) и -1.6 (GEOFON), что соответствует средним высотам заплеска на ближайшем побережье 0.22 м и 0.23 м. Гидродинамическое моделирование дало оценки максимальных высот волн 0.17 м (USGS) и 0.58 м (GEOFON). В целом система в данном случае дает результаты, которые неплохо соответствуют данным наблюдений.

В Новой Каледонии после землетрясения магнитудой 7.2, которое произошло **5.12.2018** [35, 36], было зарегистрировано цунами с высотами заплеска на островах архипелага до 2 м. На рис. 4, *а* представлены косейсмические деформации дна, рассчитанные по данным USGS и GEOFON. Видно, что оба варианта похожи и представляют собой опускание дна до 1.2 м, сопряженное с небольшим поднятием (до 0.11 м — USGS и до 0.35 м — GEOFON). Смещения поверхности океана в очаге цунами, показанные на рис. 4, *б*, по сравнению с косейсмической деформацией имеют заметно более плавную (сглаженную) форму и несколько меньшую амплитуду поднятия и опускания. Система оценила интенсивность возможного цунами в -0.3 , что предполагает среднюю высоту заплеска на ближайшем побережье 0.57 м (оценки интенсивности по USGS и GEOFON идентичны). Гидродинамическое моделирование, результаты которого представлены на рис. 4, *в*, показывают максимальную амплитуду волн 2.98 м (USGS) и 3.21 м (GEOFON). Это несколько превышает зарегистрированный максимум заплеска, но, как видно из рисунка, максимальная амплитуда достигается в области вблизи источника цунами, в то время как у берегов ближайших островов максимальная амплитуда составляет около 1.5 м. В целом по данному событию система выдала результат, который неплохо соответствует реальности.

Цунами у побережья Чили 14.06.2019 было вызвано землетрясением магнитудой 6.4 [37, 38]. Заплеск цунами составил всего 0.07 м. Оценка интенсивности цунами, сформированная системой, со-

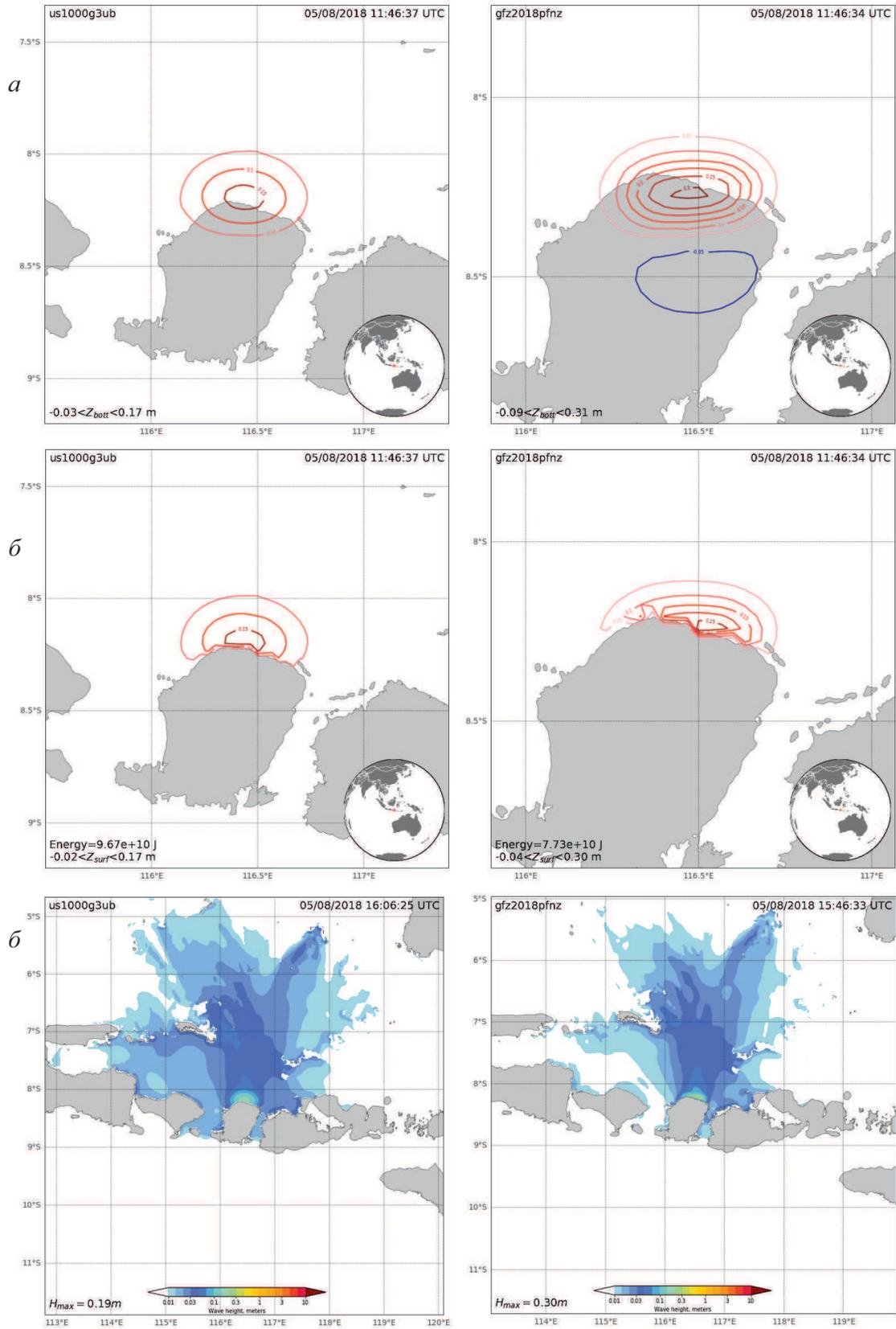


Рис. 2. Цунами 5.08.2018 на о. Бали. Деформации поверхности дна и суши (а), начальное возвышения воды в очаге цунами (б) и распределение максимальной амплитуды волн (в), рассчитанные по данным USGS (слева) и GEOFON (справа)

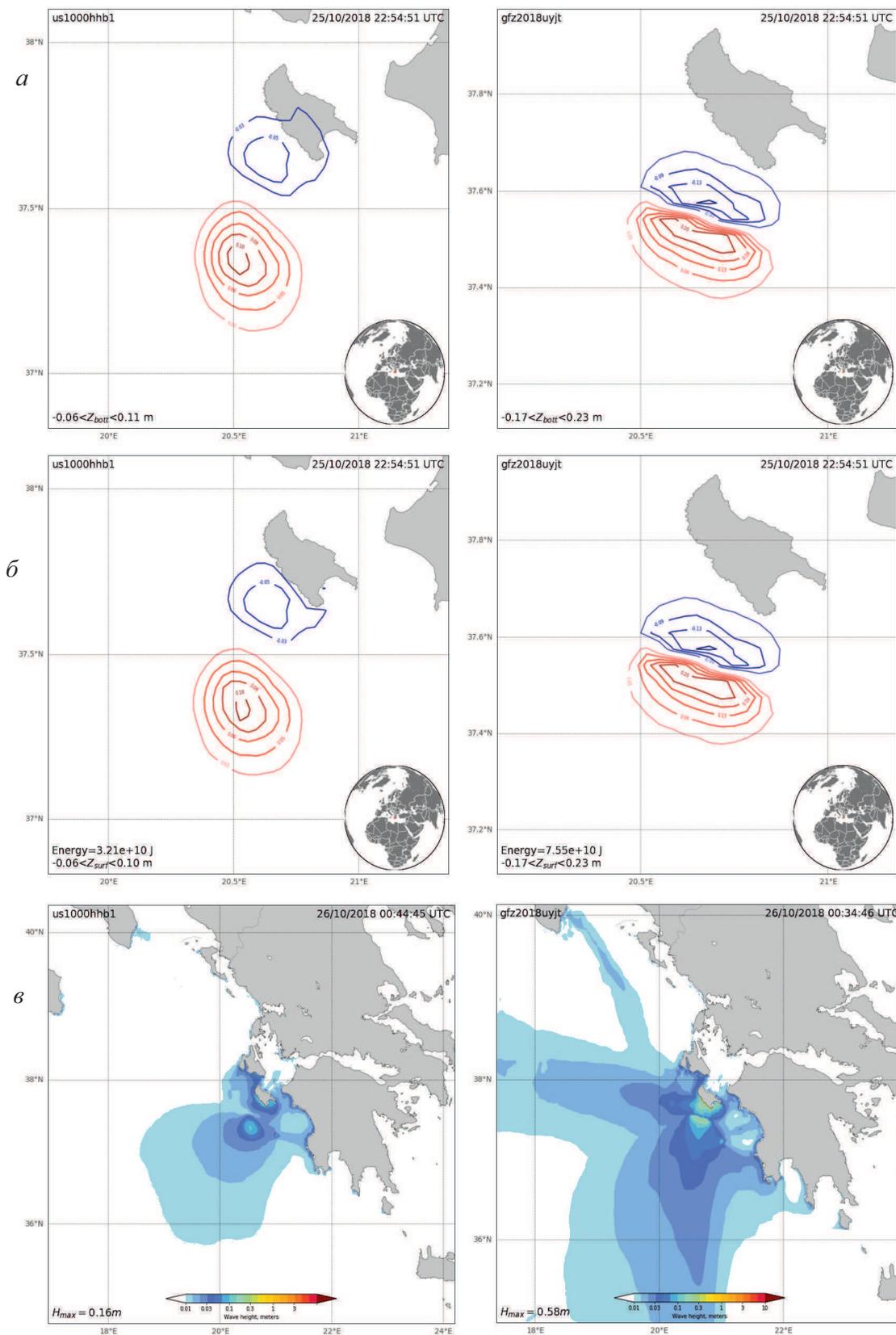


Рис. 3. Цунами 25.10.2018 в Ионическом море. Деформации поверхности дна и суши (а), начальное возвышения воды в очаге цунами (б) и распределение максимальной амплитуды волн (в), рассчитанные по данным USGS (слева) и GEOFON (справа)

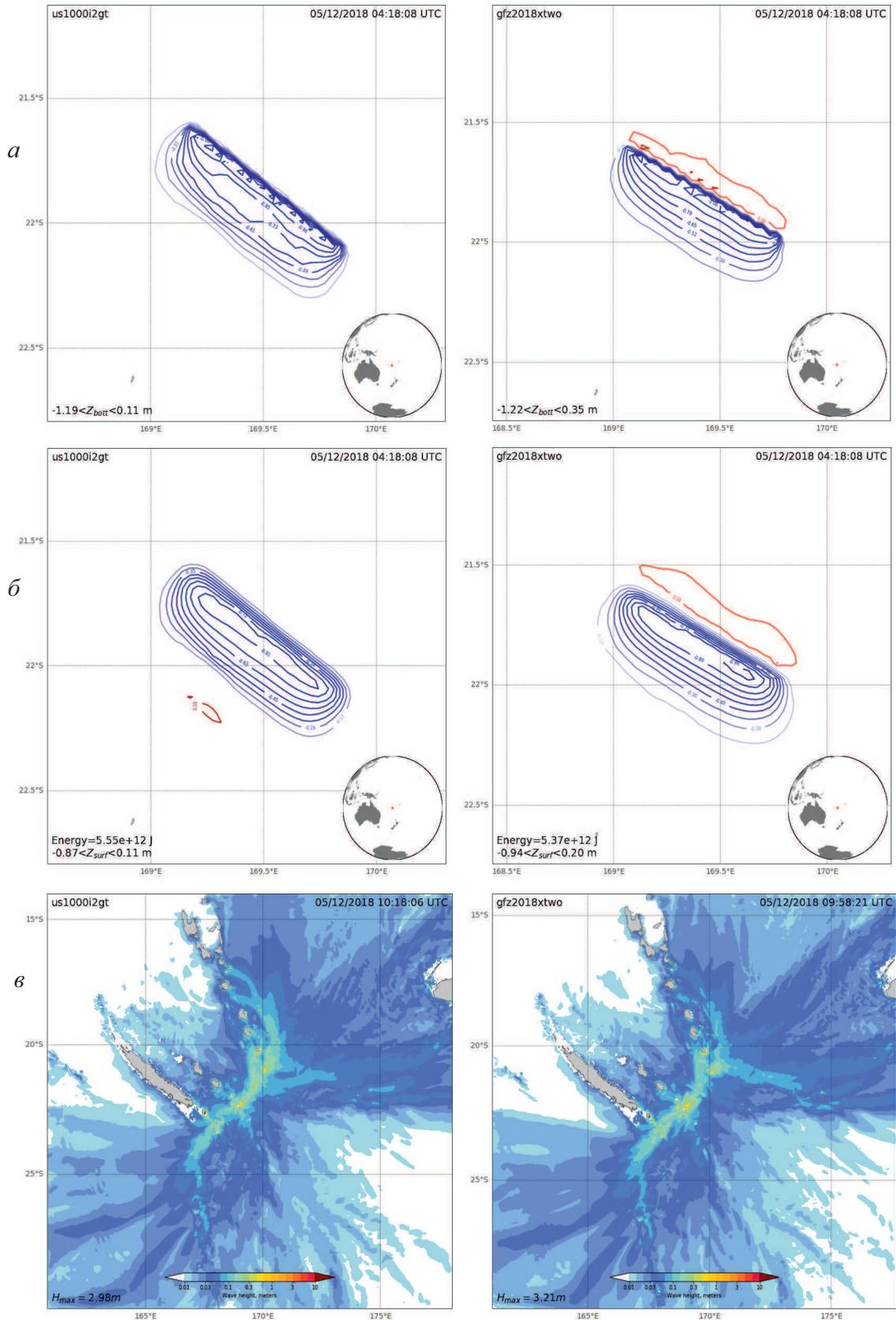


Рис. 4. Цунами 05.12.2018 в Новой Каледонии. Деформации поверхности дна и суши (а), начальные возвышения воды в очаге цунами (б) и распределение максимальной амплитуды волн (в), рассчитанные по данным USGS (слева) и GEOFON (справа)

ставила -1.8 (оценки по данным USGS и GEOFON идентичны), что соответствует средней высоте заплеска 0.2 м. Максимальные высоты волн по результатам гидродинамического моделирования достигали 0.1 м (USGS) и 0.12 м (GEOFON), что неплохо согласуется с данными наблюдений.

Цунами 15.06.2019 около архипелага Кермадек [39, 40] произошло в результате землетрясения магнитудой 7.2 (USGS). Зарегистрированные высоты заплеска достигали 0.14 м. Система оценила интенсивность события следующим образом: -1.2 (USGS) и -0.9 (GEOFON), что соответствует средним высотам заплеска 0.31 м и 0.38 м. Такая разница связана с тем, что GEOFON определила магнитуду землетрясения как 7.3 , т.е. как более мощное событие. Максимальные высоты волн по результатам гидродинамического моделирования составили 0.27 м (USGS) и 0.37 м (GEOFON). Результаты моделирования превышают наблюдаемое значение. Это, вероятно, связано с расположением области максимальных высот волн вблизи источника цунами, который заметно удален от островов архипелага, где были зарегистрированы заплески. В целом можно признать, что по данному событию система выдала вполне адекватные результаты.

Цунами 18.06.2019 в Японском море у г. Нигата [41, 42] произошло после землетрясения с магнитудой 6.4 . На японском побережье высота волн цунами составила 0.1 м. Система оценила интенсивность цунами как -1.8 (оценки по USGS и GEOFON идентичны), что соответствует средней высоте заплеска 0.2 м. Гидродинамическое моделирование волн цунами дало оценку максимальных высот волн 0.11 м (USGS) в 0.05 м (GEOFON). Оценки, выданные системой, в данном случае неплохо соответствуют реальности.

В завершении раздела отметим, что система «Tsunami Observer» за все время работы ни по одному из сейсмических событий не выдала «ложной тревоги», т.е. не было ни одного случая значительной переоценки высоты волн. В частности, система корректно отреагировала на сильное глубокофокусное (580.5 км) землетрясение у берегов Фиджи $19.08.2018$. Оценка интенсивности фиджийского цунами, сформированная системой, составила -0.7 , что соответствует средним высотам заплеска 0.44 м. Но гидродинамическое моделирование позволило почти на порядок уточнить эту оценку, показав, что амплитуды волн не должны превышать 0.05 м. Заметим, что фиджийское цунами — вероятно, из-за очень малых высот волн — не было зарегистрировано и поэтому данные о высотах заплеска отсутствуют в Global Historical Tsunami Database (NOAA) [21], хотя сам факт события в базе данных отмечен.

Остановимся на еще одном событии, которое мы не стали включать в табл. 1. Речь идет о цунами $14.05.2019$, которое было вызвано землетрясением с магнитудой 7.5 . Эпицентр этого землетрясения располагался вблизи о. Новая Британия. Аналогично фиджийскому цунами $19.08.2018$ событие $14.05.2019$ отмечено в Global Historical Tsunami Database (NOAA), но по нему отсутствует информация о высотах заплеска. В настоящее время известно только,

что после землетрясения $14.05.2019$ была объявлена тревога цунами. Система «Tsunami Observer» оценила интенсивность этого цунами как -1 (USGS) и -1.2 (GEOFON), что соответствует средним высотам заплеска 0.35 м и 0.31 м. По данным гидродинамического моделирования, максимальные высоты волн могли достигать 0.56 м и 0.31 м.

2. ВРЕМЕННЫЕ ЗАДЕРЖКИ ПОЛУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Помимо качества определения механизма очага, важным фактором для оперативности оценки цунамиопасности землетрясения является промежуток времени между самим землетрясением и появлением данных о механизме его очага, глубине, магнитуде и координатах. В случае позднего поступления информации об очаге землетрясения и, соответственно, об очаге цунами актуальность прогноза цунами может быть полностью утрачена.

Для каждого обрабатываемого сейсмического события система «Tsunami Observer» фиксировала интервал времени между моментами начала землетрясения и поступлением информации о механизме очага. Будем называть этот интервал временной задержкой. Данные о временных задержках представлены на рис. 5 как зависимость задержки от моментной магнитуды и как гистограмма. По USGS и GEOFON данные представлены различными цветами. Из рисунка видно, что времена задержки варьируются в пределах от 8 минут до нескольких часов. Задержка не превышает 2 часов для 50% (USGS) и 75% (GEOFON) для всех сейсмических событий. Надо отметить, что для сильных землетрясений задержка заметно сокращается. При магнитуде $M_w > 7.0$ в двухчасовой интервал укладываются уже 68% (USGS) и 90% (GEOFON) событий. Для землетрясений с $M_w > 7.5$ задержка не превышает одного часа. Можно заметить, что система GEOFON

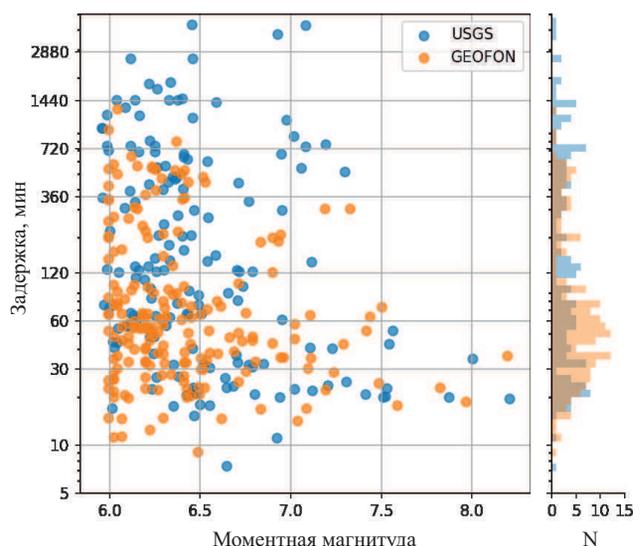


Рис. 5. Времена задержки появления информации о механизме очага землетрясения: задержка как функция магнитуды (слева), гистограмма (справа). Данные по USGS и GEOFON показаны различными цветами в соответствии с легендой

Табл. 2. Итоги функционирования системы «Tsunami Observer» с 25.01.2018 г. по 14.07.2019 г.

	По данным GEOFON	По данным USGS
Землетрясений с $M_w > 6$	195	161
Количество цунамиопасных событий	48	49
Количество событий с $-1 < I_{ts} < 0$	3	3
Количество событий с $-2 < I_{ts} < -1$	45	46

в среднем более оперативно реагирует на происходящие землетрясения.

В снижении времени задержки поступления информации об механизме очага заключается мощный ресурс для повышения оперативности оценок цунамиопасности. Полуторагодовой опыт использования данных USGS и GEOFON позволяет заключить, что оба используемых источника информации не ориентированы на решение оперативных задач. Главное их преимущество состоит в глобальном покрытии, т. е. в предоставлении информации по всем достаточно сильным землетрясениям на нашей планете. Для набора статистики и тестирования работоспособности системы «Tsunami Observer» глобальное покрытие является безусловно выигрышным. Но слишком большие времена задержки в предоставлении информации о механизме очага не позволяют сформировать оценку цунамиопасности заблаговременно. Существующее положение дел позволяет предположить, что быстрое определение механизма очага и магнитуды должно быть в зоне ответственности специализированных служб или локальных центров обработки сейсмических данных.

3. ИТОГИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «TSUNAMI OBSERVER»

В табл. 2 представлены общие итоги работы системы в период с 25 января 2018 года по 14 июля 2019 года. Видно, что количество землетрясений с магнитудой выше 6 по данным GEOFON выше, чем по данным USGS. Это может свидетельствовать о том, что GEOFON дает несколько более высокие значения магнитуды по сравнению с USGS. С другой стороны, количество цунамиопасных событий (событий, для которых происходила оценка интенсивности цунами) для обеих систем почти одинаковое (48 — GEOFON, 49 — USGS), что говорит о том, что возможное завышение оценок магнитуд не влияет на оценку цунамиопасности и, по-видимому, имеет отношение только к слабым сейсмическим событиям. Это предположение подтверждается приведенным в табл. 2 распределением интенсивности цунами-событий по интервалам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система «Tsunami Observer» функционирует с конца января 2018 г. За это время было выполнено 356 оценок цунамигенности землетрясений (195 уникальных событий по данным двух источников). Для 9 цунами-событий, по которым имелась информация о высотах заплеска, проведено сравнение выполненных оценок с данными натурных наблюдений. Следует подчеркнуть, что система не переоценила ни одно из тех слабых цунами, по которым

отсутствовали данные о заметных заплесках. По отмеченным 9 цунами-событиям сравнение показало, что система «Tsunami Observer» достаточно адекватно оценила опасность 8 событий. Исключением явилось цунами на о. Сулавеси, при возбуждении которого, помимо сейсмического толчка, важную роль играли подводные оползни. Оползневые процессы система «Tsunami Observer» на настоящем этапе учесть не может. Необходимо отметить, что не только оползневые, но также и вулканогенные цунами выпадают из поля действия «Tsunami Observer». Свежий пример — цунами 22.12.2018 в Зондском проливе, вызванное извержением вулкана Кракатау. Имея высоты заплеска до 30 м, это цунами привело к гибели 437 человек и привело к разрушению почти 3 тыс. строений [21]. Но, будучи никак не связанным с сильными сейсмическими толчками, это цунами-событие, конечно, не могло быть адекватно оценено не только системой «Tsunami Observer», но и любыми иными системами, которые основаны исключительно на сейсмических данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-00351).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пелиновский Е. Н. Гидродинамика волн цунами. Н. Новгород, 1996.
2. Bryant E. Tsunami: the underrated hazard. Springer, 2014.
3. Гусяков В. К. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. **50**. № 5.
4. Носов М. А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. **50**, № 5. С. 540.
5. Levin B. W., Nosov M. A. Physics of Tsunamis, Second Edition. Springer, 2016.
6. Поплавский А. А., Поплавская Л. Н., Спириин А. И. и др. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 65.
7. Гусяков В. К. // Сейсмические приборы. 2010. **46**, № 3. С. 5.
8. 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.
9. Users Guide for the Pacific Tsunami Warning Center Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. IOC Technical Series No 105, Revised edition. UNESCO/IOC, 2014.
10. Чебров Д. В. // Вычислительные технологии. 2019. **24**, № 1. С. 120
11. Gusiakov V. K. // Pure and appl. Geophys. 2011. **168**, A2011. P. 2033.
12. Носов М. А., Колесов С. В., Большакова А. В. и др. // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2018. № 5. 1850901.
13. Okada Y. // Bull. Seism. Society of Amer. 1985. **75**, N 4. P. 1135.

14. Leonard M. // Bull. Seism. Society of Amer. 2010. **100**, N 5A. P. 1971.
15. Tanioka Y., Satake K. // Geophys. Res. Lett. 1996. **23**, N 8. P. 861.
16. Nosov M. A., Bolshakova A. V., Kolesov S. V. // Pure and Appl. Geophys. 2014. **171**, N 12. P. 3515.
17. Носов М. А., Колесов С. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 2. С. 96. (Nosov M. A., Kolesov S. V. // Mosc. Univ. Phys. Bull. 2009. **64**, N 2. P. 208.)
18. Файн И. В., Куликов Е. А. // Вычисл. Технологии. 2011. **16**, № 2. С. 111.
19. Носов М. А., Семенцов К. А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. **50**, № . С. 612.
20. Gusiakov V. K. Tsunami history-recorded. In: Robinson A., Bernard E. (eds.) The Sea, Tsunamis. 2009. 15. P. 23.
21. National Geophysical Data Center / World Data Service: NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database. NOAA National Centers for Environmental Information. [12.07.2019]
22. Nosov M. A., Kolesov S. V. // Pure and Appl. Geophys. 2011. **168**, N 6–7. P. 1223.
23. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=us1000dyad>
24. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=gfz2018isl>
25. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=us1000g3ub>
26. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=gfz2018pfnz>
27. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=us1000gjaz>
28. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=gfz2018qwuk>
29. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=us1000h3p4>
30. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=gfz2018tabt>
31. Zaytsev A. I., Pelinovsky E. N., Yalciiner A. et al. // Dokl. Earth Sc. 2019. **486**: 588.
32. Heidarzadeh M., Muhari A., Wijanarto A. B. // Pure Appl. Geophys. 2019. **176**: 25.
33. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=us1000hhb1>
34. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=gfz2018uyjt>
35. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=us1000i2gt>
36. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=gfz2018xtwo>
37. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=us600040ja>
38. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=gfz2019lnrd>
39. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=us6000417i>
40. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=gfz2019lrj>
41. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=us600042fx>
42. <http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/?id=gfz2019lvzy>

The Operating Experience of the Tsunami Observer Automatic System for Assessment of Earthquake Tsunami Hazard

S. V. Kolesov^{1,2,a}, M. A. Nosov^{1,2,b}

¹Department 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 RAS. Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia. E-mail: ^akolesov@ocean.phys.msu.ru, ^bnosov@phys.msu.ru.

The Tsunami Observer automatic system for assessment of earthquake tsunami hazard has been operating since January 25, 2018. In this report we analyze the results of the system over the past year and a half, comparison of the estimates made by the system and in situ observations data is performed. The time delay of issue of focal mechanism, which is critical to fast tsunami hazards assessment, is discussed.

Keywords: underwater earthquake, tsunamis, co-seismic deformation, long waves, numerical simulation.

PACS: 91.30.Nw.

Received 19 July 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 6. Pp. 679–689.

Сведения об авторах

1. Колесов Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: kolesov@ocean.phys.msu.ru.
2. Носов Михаил Александрович — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: nosov@phys.msu.ru.