

УДК 551.466.62

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ, ВЫЗВАННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ С МАГНИТУДОЙ 7–8

© 2021 г. В. В. Пупатенко^{а, *}, Н. В. Шестаков^{б, с, **}

^аИнститут тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким-Ю-Чена, 65, Хабаровск, 680000 Россия

^бДальневосточный федеральный университет, ул. Суханова, 8, Владивосток, 690950 Россия

^сИнститут прикладной математики ДВО РАН, ул. Радио, 7, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: pvv2.dv@gmail.com

**e-mail: shestakov.nv@dvfu.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принята к публикации 20.08.2020 г.

Быстрое и надежное предупреждение о цунами для близких к эпицентру подводного землетрясения регионов все еще представляет собой нерешенную проблему. Единственный применяемый в России оперативный метод оценки опасности возникновения цунами – магнитудный критерий. Его использование приводит к недопустимо высокому проценту ложных тревог. Один из наиболее перспективных новых методов – моделирование очага землетрясения на основе данных о косейсмических смещениях, зарегистрированных на прибрежных пунктах наблюдений по данным Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В работе изучается возможность использования этого метода для внутриплитных землетрясений с магнитудой 7–8, для которых необходимо определять положение поверхности разрыва. На основе проведенных численных экспериментов получены оценки точности и надежности определения параметров землетрясения в зависимости от магнитуды, количества и взаимного расположения ГНСС-станций. Показано, что определение по ГНСС-данным всех основных параметров модели очага землетрясения с магнитудой 7.4 и выше вполне возможно, хотя и с не слишком высокой надежностью. Сделан вывод о целесообразности использования ГНСС-данных в работе служб предупреждения о цунами, на начальном этапе в тестовом режиме.

Ключевые слова: ГНСС, цунами, раннее предупреждение о цунами, ложные тревоги цунами, очаг землетрясения

DOI: 10.31857/S0203030620060164

ВВЕДЕНИЕ

Катастрофические землетрясения вблизи о. Суматра в Индийском океане (26.12.2004 г., M_w 9.2–9.3) и у восточных берегов о. Хонсю, Япония (11.03.2011 г., M_w 9.1), приведшие к огромным человеческим жертвам и материальным потерям, наглядно показали важность оперативного определения основных характеристик цунами и своевременного предупреждения населения о его приближении [Blewitt et al., 2009; Tsushima, Ohta, 2014].

Для близких к эпицентру подводного землетрясения регионов предупреждение о цунами должно быть сформировано уже через 5–15 мин после землетрясения, в зависимости от расстояния до ближайшего населенного побережья. По этой причине для первого предупреждения обычно не могут использоваться данные с береговых постов, океанических донных сенсоров и буев или дан-

ные удаленных широкополосных сейсмостанций. В то же время, локальные сети сейсмических станций позволяют быстро определить только положение эпицентра, глубину гипоцентра и магнитуду землетрясения, при этом магнитуда сильнейших ($M > 8$) землетрясений систематически недооценивается [Wright et al., 2012]. Магнитудный критерий (тревога объявляется, если магнитуда подводного землетрясения превышает установленный для региона порог) по-прежнему остается основным методом предупреждения о цунами для близких к эпицентру регионов, а в Службе предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России – единственным. Использование магнитудного критерия приводит к недопустимо высокому проценту ложных тревог, количество которых по теоретическим оценкам должно достигать 77–81% [Поплавский, Храмушин, 2007;

Гусяков, 2016]. По статистике Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России реальное количество ложных тревог составляет от 67 до 89% [Поплавский, Храмушин, 2007; Шикотанское землетрясение ..., 2015], в зависимости от способа подсчета. Несмотря на то, что теоретически вероятность пропуска цунами ничтожна, три таких случая произошли в 1960-х и 1970-х гг. XX века [Поплавский, Храмушин, 2007].

Ряд коллективов исследователей предлагают и развивают различные альтернативные способы раннего предупреждения о цунами для близких к эпицентру побережий, однако универсального и надежного метода пока не найдено. Например, использование сейсмологических данных для оценки магнитуды [Абубакиров, 2016] и для определения механизма землетрясения [Павлов, Абубакиров, 2012] возможно, но, зачастую, ограничивается очень высокими требованиями к сейсмическим сетям [An, Meng, 2016], слишком большими затратами времени на получение результата, не до конца решенной проблемой систематической недооценки магнитуды сильнейших ($M > 8$) землетрясений [Wright et al., 2012].

В последнее время интенсивно развиваются и уже тестируются на практике новые подходы к моделированию цунами, основанные на использовании данных Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), полученных на прибрежных стационарных пунктах наблюдений [Tsushima, Ohta, 2014; Kawamoto et al., 2016]. Поступающие от ГНСС-станций и обрабатываемые в режиме реального времени спутниковые измерения позволяют определять параметры модели очага землетрясения путем решения обратной задачи, используя зарегистрированные косейсмические смещения, реже – на основе динамических смещений [Melgar et al., 2012; O'Toole et al., 2012]. Модель очага землетрясения, в свою очередь, представляет собой основную исходную информацию для моделирования процесса распространения цунами и определения высоты и времени прихода волн на заданные участки побережья.

Перспективным считается также использование ГНСС-данных для непосредственного измерения высоты цунами и отслеживания его распространения с навигационных систем кораблей в эпицентральной зоне [Inazu et al., 2016, 2018] или со стационарных буев [Kato et al., 2000, 2005; Tsushima, Ohta, 2014]. У этих подходов есть несомненное преимущество – измеряются реальные параметры волн, в том числе с учетом влияния вторичных источников (подводных оползней). Однако и требования для их применения очень высоки. Например, использование навигационных данных кораблей имеет смысл только в зонах с интенсивным судоходством и требует стандар-

тизации навигационных систем, непрерывной и стабильной работы средств связи.

В настоящей работе рассматривается способ моделирования очага цунамигенного землетрясения, основанный на оперативном определении по ГНСС-данным косейсмических смещений. В построении систем, использующих такой способ применительно к сильнейшим землетрясениям в зонах субдукции, за последнее десятилетие был достигнут существенный прогресс [Wright et al., 2012; Melgar et al., 2016; Ohta et al., 2018]. Система раннего предупреждения о цунами на основе ГНСС-данных в Японии (REGARD) уже начала свою работу и показывает первые реальные результаты [Kawamoto et al., 2016, 2017]. Однако неясными остаются возможность и перспективы применения ГНСС-данных для оперативного моделирования цунами, вызванных землетрясениями с магнитудой менее 8, в первую очередь внутриплитными. Внутриплитные землетрясения вносят свои сложности в работу ГНСС-систем предупреждения о цунами. В системе REGARD, как и в других проектируемых и тестируемых системах, положение поверхности разрыва задается с помощью априорных значений, базирующихся на результатах предыдущих сейсмологических и геолого-геофизических исследований. Эта априорно задаваемая информация может оказаться неточной или даже неверной, особенно в зонах пересечения разломов или при ошибках определения положения эпицентра. Основная цель настоящей работы – на основе численного моделирования выявить основные закономерности, влияющие на возможность оперативного определения по данным ГНСС-наблюдений параметров модели очага землетрясений с магнитудой 7–8, включая положение поверхности разрыва, получить оценки точности и надежности определения этих параметров в зависимости от магнитуды землетрясения, количества и взаимного пространственного расположения ГНСС-станций и эпицентра землетрясения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемая принципиальная схема применения ГНСС-данных в системах раннего предупреждения о цунами [Hoechner et al., 2013; Blewitt et al., 2009; Ohta et al., 2012] заключается в следующем. После получения информации о землетрясении, а также первых оценок по сейсмическим данным координат эпицентра, глубины гипоцентра и магнитуды, на ближайших к эпицентру ГНСС-станциях рассчитываются косейсмические смещения. Эти величины используются как исходные данные для решения обратной задачи по определению параметров очага землетрясения: оцениваются все или только те параметры, для которых невозможно задать стан-

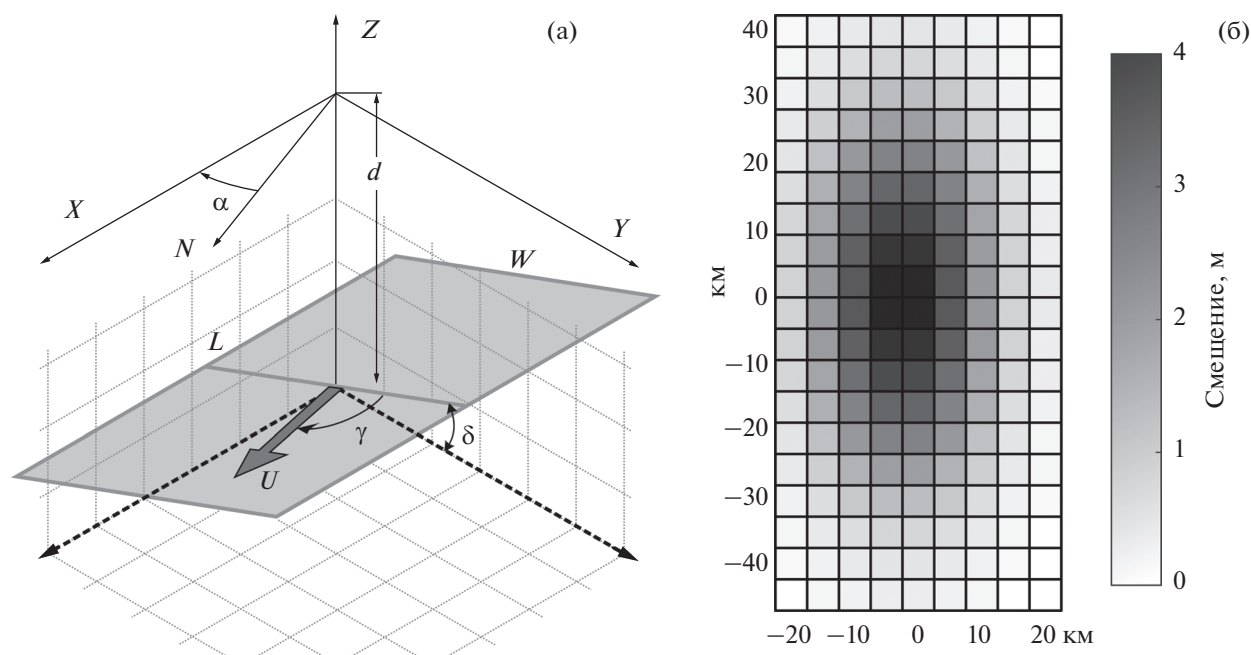


Рис. 1. Модель очага землетрясения.

а – основные параметры модели: W , L – размеры очаговой области, U – среднее смещение вдоль плоскости сейсморазрыва, d – глубина очага, α – азимут простираения плоскости сейсморазрыва (ось N направлена на север), δ – угол падения плоскости, γ – направление смещения в плоскости сейсморазрыва; б – пример неоднородного распределения смещений на поверхности разрыва.

дартные или расчетные значения. К основным определяемым параметрам относятся размер (L – длина, W – ширина) и положение поверхности смещения, направление – γ , средняя величина или распределение смещений по поверхности (рис. 1). Положение плоскости сейсморазрыва задается азимутом простираения – α , углом падения – δ , и средней глубиной – d . По основным параметрам рассчитываются производные характеристики: сейсмический момент M_0 и моментная магнитуда M_w [Hanks, Kanamori, 1979].

Для расчета инициированных землетрясением постоянных (косейсмических) горизонтальных и вертикальных смещений дна наиболее часто используется известная модель Окады [Okada, 1985], связывающая их с параметрами модели сейсмического очага. Косейсмические смещения дна, наряду с батиметрическими данными, являются основной исходной информацией для моделирования процесса распространения цунами и определения высоты и времени прихода волн на заданные участки побережья [Ohta et al., 2012; Tsushima, Ohta, 2014].

С целью оценки возможностей получения параметров сейсмического очага по ГНСС-данным для вышеуказанного диапазона магнитуд были проведены численные эксперименты, которые состояли из следующей последовательности действий.

1. Задавалось взаимное положение эпицентра землетрясения и ГНСС-станций. Были рассмотрены четыре принципиальных схемы взаимного расположения эпицентра землетрясения и пунктов наблюдений (рис. 2). Количество станций показано условно и варьировалось в широких пределах. Приведенные схемы применимы к большей части потенциальных очагов локальных цунами, угрожающих побережью Дальнего Востока России [Гусяков, 2016; Mackey et al., 2010], хотя фактические расстояния в каждом случае могут значительно отличаться.

2. Фиксировались “эталонные” значения параметров очага, рассчитываемые исходя из величины магнитуды по соотношениям между моментной магнитудой, длиной, шириной очаговой области и величиной смещения [Thingbaijam et al., 2017]. Углы α , δ и γ , а также глубина гипоцентра d задавались как случайные величины с равномерным распределением между максимальным и минимальным значениями (0° – 360° для углов α и γ , 10° – 80° для угла δ , 20–50 км для глубины гипоцентра).

3. Генерировались синтетические “наблюденные” косейсмические смещения с использованием модели Окады [Okada, 1985], в соответствии с заданными “эталонными” параметрами модели очага и с учетом типичных среднеквадратических

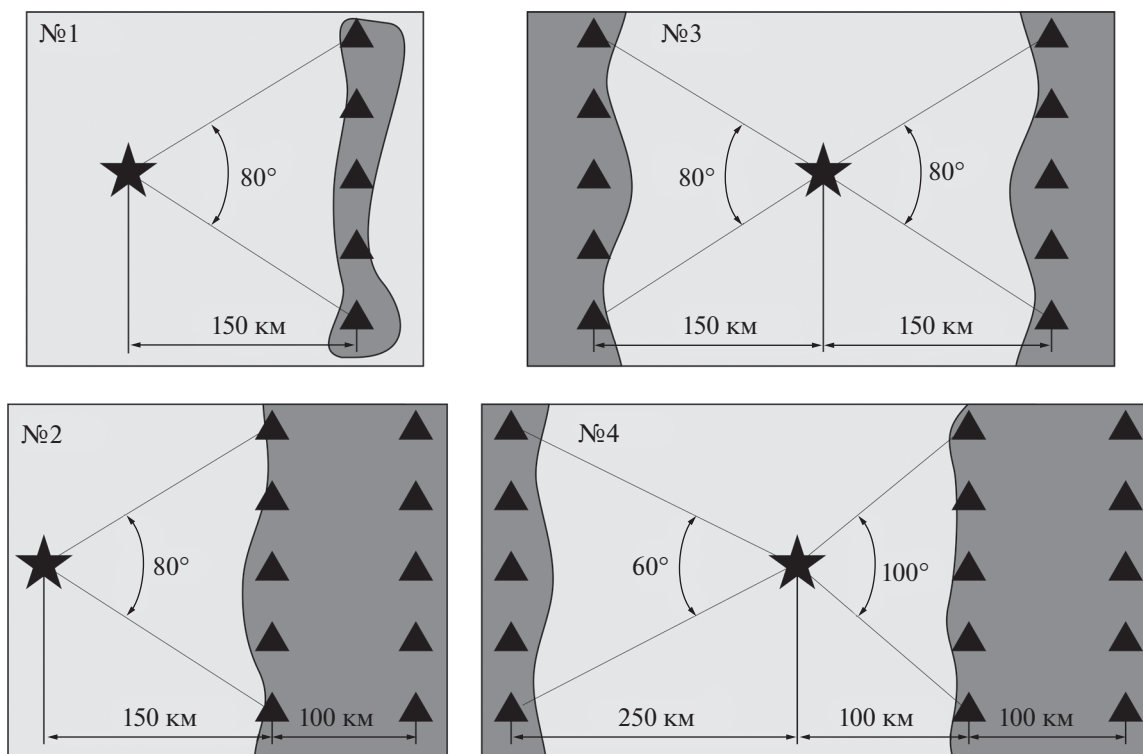


Рис. 2. Схемы взаимного расположения эпицентра землетрясения (звездочка) и пунктов наблюдений (треугольники, количество которых в каждой группе показано условно).

ошибок определения косейсмических смещений [Пупатенко, 2019].

4. Решалась обратная задача по определению параметров модели очага землетрясения путем подбора их значений, минимизирующих суммарную невязку полученных в результате решения обратной задачи и вычисленных на шаге 3 синтетических косейсмических смещений. На первом этапе рассматривались все возможные значения параметров с заданным шагом изменения (0.1 для магнитуды, 10° для углов α и γ , 20° для угла δ , 10 км для глубины гипоцентра). Найденные таким образом предварительные значения параметров очага затем уточнялись перебором вокруг этих значений, но с меньшим шагом изменения магнитуды (0.03) и углов α , δ и γ (3°). Дополнительно проверялись значения углов α и γ , отличающиеся от предварительно найденных на 180° . Как показали предварительные результаты, дальнейшее уменьшение шага изменения параметров не имеет смысла, так как практически не приводит к уменьшению получаемых невязок эталонных и рассчитанных значений параметров очага. Время, необходимое на один полный расчет, не превышало одной секунды на персональном компьютере с процессором Intel® Core™ i5-4570.

Помимо ошибок определения косейсмических смещений, в стохастическую модель были также включены ошибки определения координат

эпицентра землетрясения путем добавления к их априорным значениям случайной величины с нормальным распределением и среднеквадратическим отклонением 10 км.

Для упрощения и уменьшения времени вычислений на четвертом шаге использовалась модель точечного источника. Это упрощение может приводить к существенным искажениям рассчитываемых деформаций морского дна, но оно было необходимо для сохранения приемлемого времени проведения расчета. В реально проектируемых и гипотетических системах предупреждения о цунами модель точечного источника часто используется как первое приближение [Colombelli et al., 2013]. В модели точечного источника параметры, определяющие размер очаговой области и среднюю амплитуду смещения, теряют свой смысл, и их нет необходимости определять. Поэтому вместо них одним из определяемых параметров была непосредственно моментная магнитуда M_w .

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Здесь и далее рассматривается только наиболее интересный и мало исследованный случай, при котором углы простираения и падения, задающие положение плоскости сейсморазрыва, подлежат определению и не фиксируются априорны-

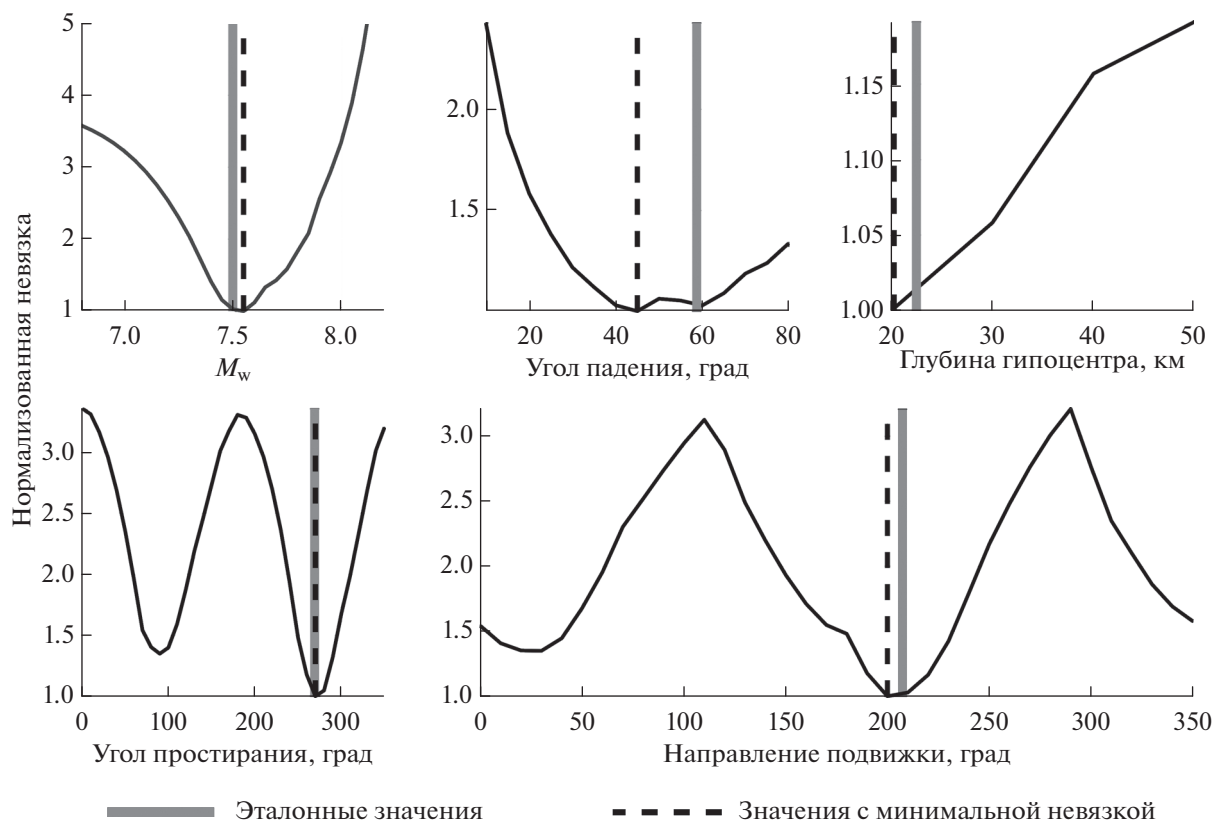


Рис. 3. Пример результатов определения параметров модели очага землетрясения. На каждом графике приведены зависимости нормализованной суммарной средневзвешенной невязки “наблюденных” и синтетических косейсмических смещений от значения параметра. Вертикальными серыми линиями отмечено эталонное значение параметра, пунктирными – значение, определенное с минимальной невязкой в результате решения обратной задачи.

ми значениями. Этот вариант характерен в первую очередь для внутриплитных землетрясений. В этом случае необходимо определять следующие параметры модели очага землетрясения: сейсмический момент M_0 и моментную магнитуду M_w (принимая точечную модель очага и учитывая ранее описанные соображения), глубину гипоцентра, направление смещения γ , азимут простирания α и угол падения δ .

Были проведены несколько серий численных экспериментов для каждой из принципиальных схем расположения станций, отличающихся количеством ГНСС-станций. Результаты показывают, что удовлетворительный результат теоретически можно получить даже при малом количестве станций, начиная с трех–четырех. Увеличение количества станций ожидаемо ведет к уменьшению невязок. Далее будут показаны результаты, полученные при использовании 32 станций. Влияние количества станций на получаемый результат обсуждается отдельно.

На рис. 3 приведен пример результатов одного расчета. Для статистического анализа формировались выборки невязок определения параметров модели очага. Каждая выборка содержит резуль-

таты 4000 расчетов, ей соответствуют определенное количество ГНСС-станций, одна из четырех приведенных на рис. 2 схем их расположения, а также фиксированное “эталонное” значение моментной магнитуды (от 7 до 8 с шагом 0.1).

На рис. 4 приведены примеры гистограмм невязок определения параметров модели очага землетрясения (при магнитуде $M_w = 7.4$). Необходимо отметить, что некоторое количество невязок углов α и γ имеет значения порядка 180° , а невязки величиной $\pm 60^\circ - 120^\circ$ практически отсутствуют. Для предотвращения искажения рассчитываемых среднеквадратических ошибок (СКО) параметров модели очага, мы выделяли невязки, превышающие по модулю 90° , как “выбросы” и, зафиксировав их количество, исключали их из анализа. При этом само наличие невязок величиной $\pm 170^\circ - 180^\circ$ в углах α и/или γ не означает, что построенная модель очага землетрясения в корне неверна. Она может быть адекватна решаемой задаче, особенно когда значения угла падения плоскости близки к 90° , а невязки порядка $\pm 180^\circ$ получены в обоих углах α и γ . Более подробный анализ причин и последствий появления этих невязок выходит за рамки данной работы и не про-

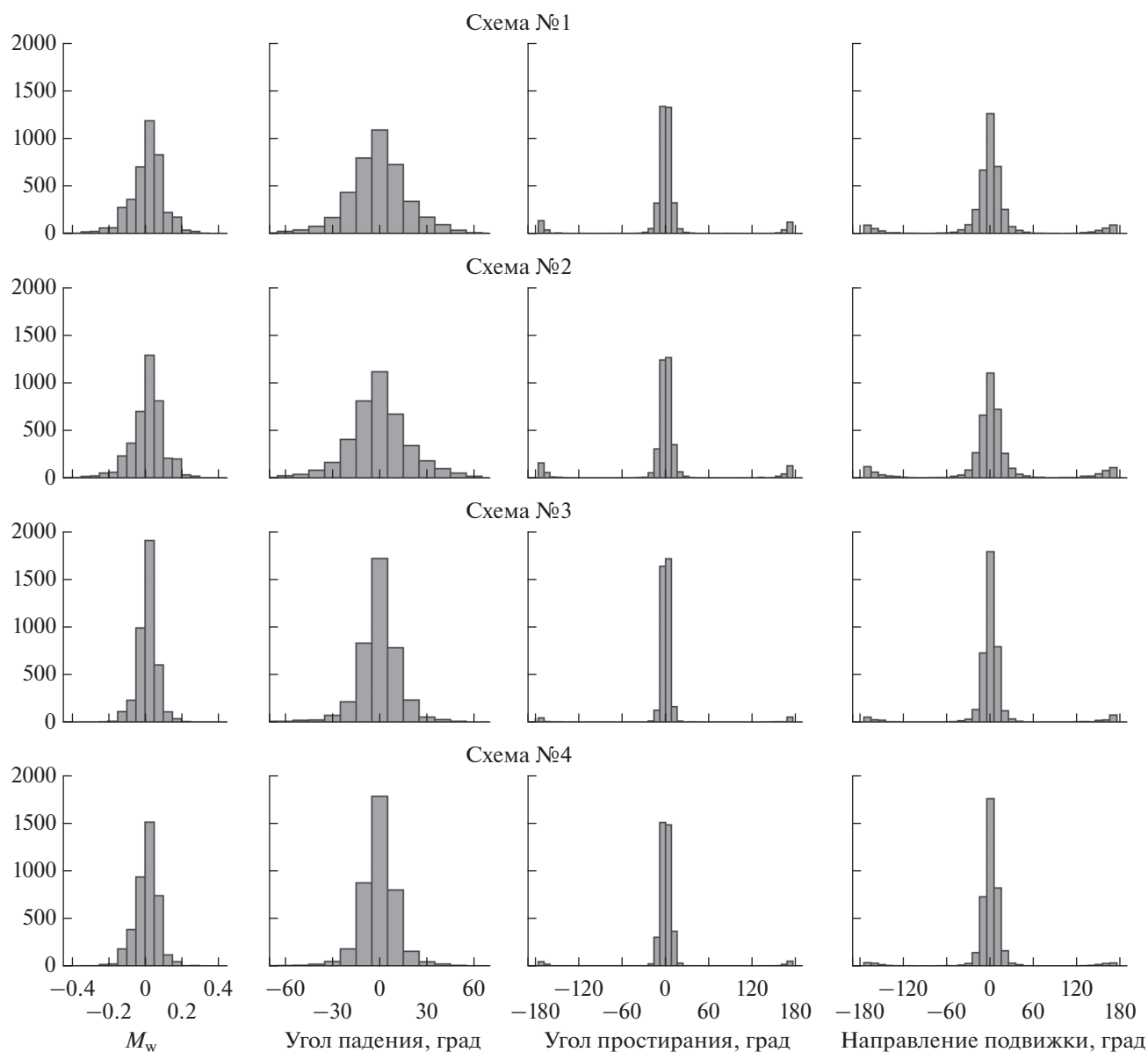


Рис. 4. Гистограммы невязок определения параметров модели очага землетрясения при $M_w = 7.4$ и использовании 32 ГНСС-станций.

водился. На рис. 5 приведены полученные зависимости СКО параметров, а также количества “выбросов” от магнитуды землетрясения. На рис. 6 показаны зависимости СКО параметров очага землетрясения от количества станций для каждого из четырех вариантов расположения ГНСС-станций (при $M_w = 7.4$).

Приведенные на рис. 4–6 результаты показывают, что точность получения различных параметров существенно отличается. С относительно малыми СКО определяется магнитуда (СКО ≤ 0.2 даже при $M_w = 7$, СКО = 0.05–0.10 при $M_w \geq 7.4$), это показывает, что ГНСС-сети могут быть эффективно использованы, как минимум, для полу-

чения альтернативной оперативной (и весьма точной) оценки магнитуды сильного землетрясения, при этом из априорных данных необходимы только координаты эпицентра. Также достаточно точно определяется направление простираения плоскости сейморазрыва. Значительно хуже определяется направление смещения в плоскости сейморазрыва и, особенно, угол падения, хотя именно эти параметры, наряду с магнитудой, в значительной степени определяют величины косейсмических смещений морского (океанического) дна и в итоге высоту волн цунами на побережье.

Из рис. 5 и 6 видно, что более широкое азимутальное распределение ГНСС-станций относи-

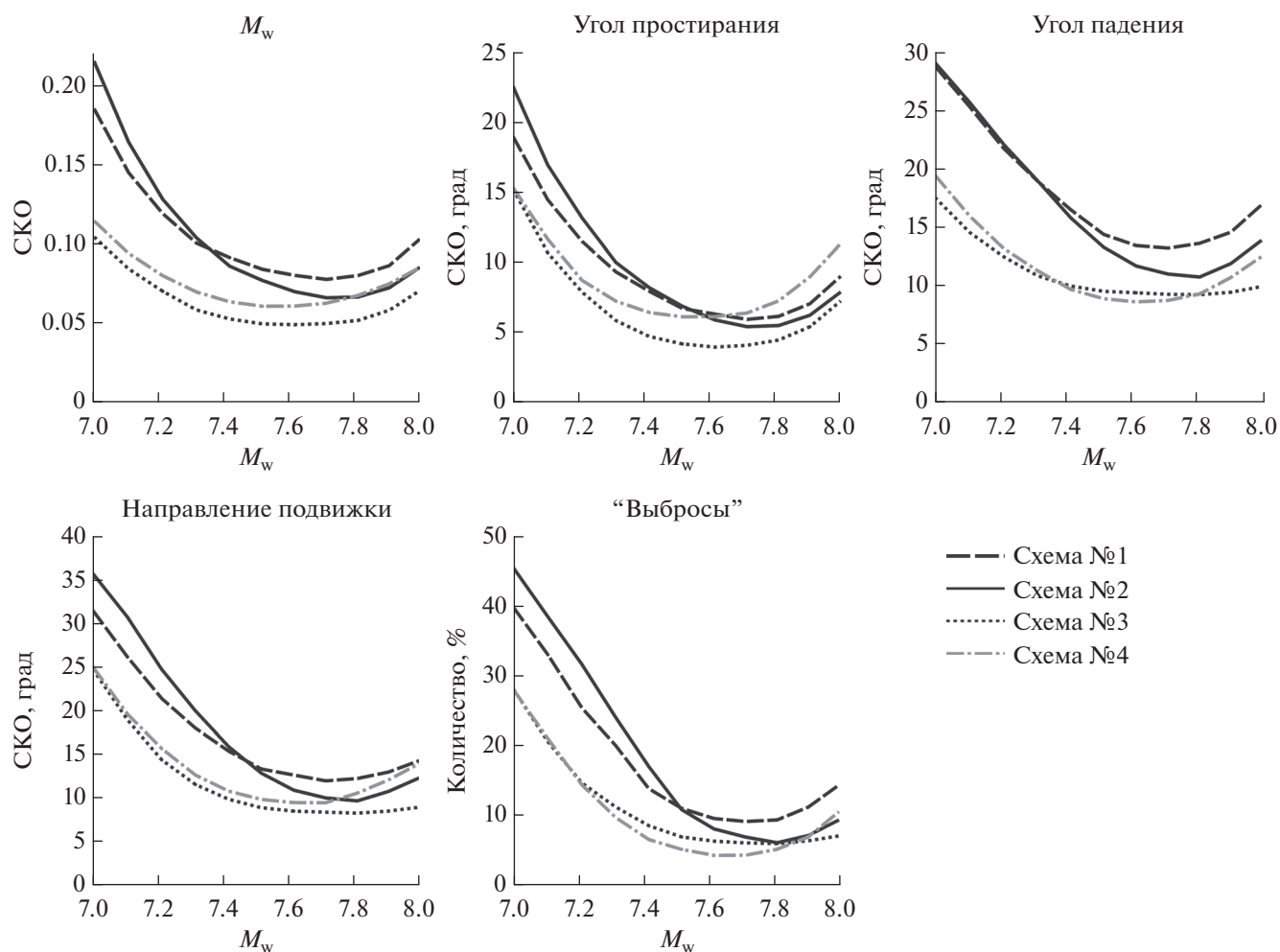


Рис. 5. Зависимости среднеквадратических ошибок магнитуды, угла простирания, угла падения и направления смещения в плоскости сейсморазрыва, а также количества “выбросов” от “эталонного” значения магнитуды землетрясения (при использовании 32 ГНСС-станций).

тельно эпицентра (схемы 3 и 4) предпочтительно и позволяет до 1.5 раз уменьшить СКО определения углов δ и γ , до двух раз уменьшить СКО определения магнитуды и количество “выбросов”. Эти схемы, однако, применимы в очень ограниченных случаях, например, для северо-восточной части Японского моря, включая Татарский пролив.

Как видно из рис. 5, СКО параметров перестают уменьшаться при достижении магнитуды 7.6–7.8, а при дальнейшем ее увеличении даже немного возрастают. Очевидно, что это следствие использования точечной модели очага землетрясения, поскольку при $M_w \geq 7.8$ реальные размеры очаговой зоны становятся сопоставимы с принятыми в схемах расстояниями до ближайших ГНСС-станций. Эта проблема может быть решена либо введением ограничения на минимальное расстояние от эпицентра до ГНСС-станций, либо использованием (хотя бы для таких магнитуд) более сложных моделей очаговой зоны, что существенно

увеличивает сложность и трудоемкость решения обратной задачи.

Анализ зависимостей СКО определения параметров очага землетрясения от количества станций показывает, что увеличение количества станций значительно повышает надежность определения параметров очага (уменьшается количество “выбросов”), но дает достаточно медленное увеличение точности их получения. Заметное снижение СКО искомых параметров наблюдается при включении в ГНСС-сеть более 8 станций.

Необходимо отметить, что ошибки в определении отдельных параметров, очевидно, взаимосвязаны, следовательно, значения СКО параметров очага землетрясения не позволяют напрямую оценить ожидаемые ошибки определения смещений морского дна. Этот вопрос остался за рамками настоящей работы.

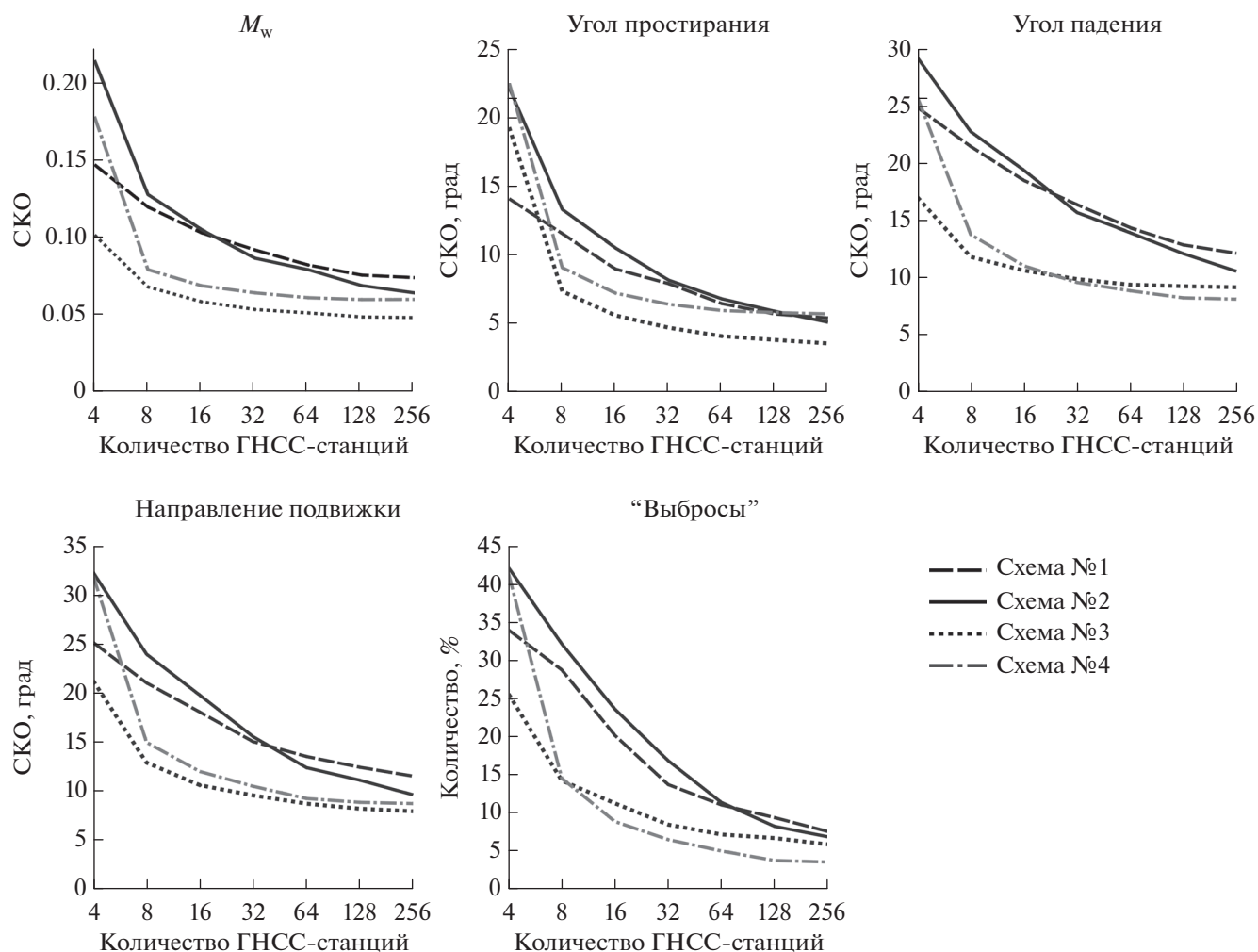


Рис. 6. Зависимости среднеквадратических ошибок магнитуды, угла простирации, угла падения и направления смещения в плоскости сейсморазрыва, а также количества "выбросов" от количества используемых ГНСС-станций (при $M_w = 7.4$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты численных экспериментов показывают, что практическая реализация систем, определяющих по ГНСС-данным все основные параметры модели очага землетрясения с магнитудой 7.2–7.4 и выше, включая положение плоскости сейсморазрыва, вполне возможна. Их эффективность зависит от многих факторов, в первую очередь от количества ГНСС-станций, их расположения относительно эпицентра сейсмического события, точности априорной информации.

Одна из главных проблем, тормозящих развитие и широкое практическое внедрение таких систем, — относительно невысокая надежность определения параметров очага землетрясения. Полученные результаты показывают, что этот показатель не превышает 90%, даже когда азимутальное распределение ГНСС-станций близко к опти-

мальному. Частично эту проблему может решить значительное увеличение количества ГНСС-станций вместе с отказом от использования точечной модели очага.

Тем не менее, ГНСС-данные необходимо как можно быстрее внедрять в работу служб предупреждения о цунами, особенно в тех регионах, где уже существуют более или менее плотные постоянно действующие ГНСС-сети и высока степень возникновения цунамигенных землетрясений. Даже в тестовом режиме, эта технология может служить, как минимум, в качестве источника дополнительной независимой и достаточно точной оценки моментной магнитуды землетрясения. В процессе тестовой эксплуатации будет накоплен столь необходимый практический и теоретический опыт использования и калибровки таких систем как на реальных цунамигенных землетрясениях, так и сейсмических событиях, не генериру-

ющих цунами. По нашему мнению, создание такой системы, например, на полуострове Камчатка – уже вполне технически решаемая задача.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Е.С. Ступаковой за помощь в оформлении рисунков.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН и Института прикладной математики ДВО РАН, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00178.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Федосеева Е.Н.* Устойчивая оценка магнитуды M_{wp} умеренных и сильных землетрясений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2016. Т. 30. № 2. С. 54–65.
- Гусяков В.К.* Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 9. С. 1601–1615.
<https://doi.org/10.15372/GiG20160901>
- Павлов В.М., Абубакиров И.Р.* Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2012. № 2. С. 149–158.
- Поплавский А.А., Храмушин В.Н.* Методы оперативного прогноза цунами и штормовых наводнений. Владивосток: Дальнаука, 2008. 174 с.
- Пупатенко В.В.* Точность оперативного определения по ГНСС-данным статических смещений, вызванных землетрясениями // Успехи современного естествознания. 2019. № 3. С. 78–83.
<https://doi.org/10.17513/use.37074>
- Шикотанское землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года. Хроника событий, анализ последствий и современное состояние проблемы: сборник статей / Под ред. И.Н. Тихонова, Г.В. Шевченко. Южно-Сахалинск: ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН, 2015. 128 с.
- An C., Meng L.* Application of array backprojection to tsunami prediction and early warning // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. № 8. P. 3677–3685.
<https://doi.org/10.1002/2016GL068786>
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C. et al.* GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems // J. Geod. 2009. V. 83. № 3–4. P. 335–343.
<https://doi.org/10.1007/s00190-008-0262-5>
- Colombelli S., Allen R.M., Zollo A.* Application of real-time GPS to earthquake early warning in subduction and strike-slip environments // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2013. V. 118. № 7. P. 3448–3461.
<https://doi.org/10.1002/jgrb.50242>
- Hanks T.C., Kanamori H.* A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № B5. P. 2348–2350.
<https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>
- Hoechner A., Ge M., Babeyko A.Y. et al.* Instant tsunami early warning based on real-time GPS – Tohoku 2011 case study // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2013. V. 13. № 5. P. 1285–1292.
<https://doi.org/10.5194/nhess-13-1285-2013>
- Inazu D., Waseda T., Hibiya T. et al.* Assessment of GNSS-based height data of multiple ships for measuring and forecasting great tsunamis // Geosci. Lett. 2016. V. 3. № 25. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1186/s40562-016-0059-y>
- Inazu D., Ikeya T., Waseda T. et al.* Measuring offshore tsunami currents using ship navigation records // Prog. Earth Planet. Sci. 2018. V. 5. № 38. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1186/s40645-018-0194-5>
- Kato T., Terada Y., Kinoshita M. et al.* Real-time observation of tsunami by RTK-GPS // Earth, Planets and Space. 2000. V. 52. № 10. P. 841–845.
<https://doi.org/10.1186/BF03352292>
- Kato T., Terada Y., Ito K. et al.* Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy // Earth, Planets and Space. 2005. V. 57. № 4. P. 297–301.
<https://doi.org/10.1186/BF03352566>
- Kawamoto S., Hiyama Y., Ohta Y. et al.* First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto earthquakes // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. № 190. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0564-4>
- Kawamoto S., Ohta Y., Hiyama Y. et al.* REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2017. V. 122. № 2. P. 1324–1349.
<https://doi.org/10.1002/2016JB013485>
- Mackey K.G., Fujita K., Hartse H.E. et al.* Seismicity Map of Eastern Russia, 1960–2010 // Seismol. Res. Lett. 2010. V. 81. № 5. P. 761–768.
<https://doi.org/10.1785/gssrl.81.5.761>
- Melgar D., Bock Y., Crowell B.W.* Real-time centroid moment tensor determination for large earthquakes from local and regional displacement records // Geophys. J. Int. 2012. V. 188. № 2. P. 703–718.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05297.x>
- Melgar D., Allen R.M., Riquelme S. et al.* Local tsunami warnings: Perspectives from recent large events // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. № 3. P. 1109–1117.
<https://doi.org/10.1002/2015GL06710>
- Ohta Y., Kobayashi T., Tsushima H. et al.* Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (M_w 9.0) // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2012. V. 117. B02311.
<https://doi.org/10.1029/2011JB008750>
- Ohta Y., Inoue T., Koshimura S. et al.* Role of Real-Time GNSS in Near-Field Tsunami Forecasting // J. Disaster Res. 2018. V. 13. № 3. P. 453–459.
<https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0453>

Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.

O’Toole T.B., Valentine A.P., Woodhouse J.H. Centroid-moment tensor inversions using high-rate GPS waveforms // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 191. № 1. P. 257–270.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05608.x>

Thingbaijam K.K.S., Martin Mai P., Goda K. New Empirical Earthquake Source-Scaling Laws // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2017. V. 107. № 5. P. 2225–2246.
<https://doi.org/10.1785/0120170017>

Tsushima H., Ohta Y. Review on near-field tsunami forecasting from offshore tsunami data and onshore GNSS data for tsunami early warning // *J. Disaster Res.* 2014. V. 9. № 3. P. 339–357.

<https://doi.org/10.20965/jdr.2014.p0339>

Wright T.J., Houlié N., Hildyard M. et al. Real-time, reliable magnitudes for large earthquakes from 1 Hz GPS precise point positioning: The 2011 Tohoku-Oki (Japan) earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L12302.

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007604243>

Implementation of Global Navigation Satellite Systems for the Early Tsunami Warning Caused by the Magnitude 7–8 Earthquakes

V. V. Pupatenko^{1, *} and N. V. Shestakov^{2, 3, **}

¹*Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Kim-Yu-Chena str., 65, Khabarovsk, 680000 Russia*

²*Far Eastern Federal University, Sukhanova str., 8, Vladivostok, 690950 Russia*

³*Institute of Applied Mathematics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Radio str., 7, Vladivostok, 690041 Russia*

**e-mail: pvv2.dv@gmail.com*

***e-mail: shestakov.nv@dfyu.ru*

The rapid and reliable tsunami forecasting for the regions close to the epicenter of the earthquake remains the unsolved problem. The only method of rapid tsunami hazard estimation used in Russia is the magnitude criterion. It leads to the enormous amount of false alarms. One of the most promising new method is the earthquake source parameters modeling based on the co-seismic slips calculated at the coastal Global Navigation Satellite Systems (GNSS) stations. In this paper, we focus on the possibility of using this method for the magnitude 7–8 intraplate earthquakes, for which it is necessary to determine the rupture plane orientation. Based on the numerical experiments, we obtained estimates of the accuracy and reliability of the earthquake parameters determination depending on the magnitude, number and relative position of GNSS stations. We show that it is possible to determine all the main parameters of the source model of the $M \geq 7.4$ earthquake, based on the GNSS data. We conclude that it is advisable to use GNSS data in tsunami warning systems, at the initial stage in test mode.

Keywords: GNSS, tsunami, tsunami early warning, tsunami false alarms, earthquake source