

УДК 550.334

АСИММЕТРИЧНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСЫ ПЕРЕД БОЛЬШИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ

© 2019 г. Г. А. Соболев*, Н. А. Закржевская, С. М. Киреевкова

*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН
123242 Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1
e-mail: sobolev@ifz.ru

Поступила в редакцию 21.11.2017 г.

Исследована динамика сейсмических шумов в минутном диапазоне периодов по записям широкополосных станций IRIS перед катастрофическим землетрясением 11 марта 2011 г. в Японии. Формализованной методикой выделены одиночные асимметричные импульсы, на порядок превосходящие по амплитуде уровень шума и разделенные между собой интервалом более 30 минут. Установлено, что на станции MAJO, расположенной на о. Хонсю в 400 км от эпицентра землетрясения, частота следования импульсов возросла 30 января 2011 г. и сохранялась высокой до 2 марта 2011 г. Такого явления на станции MAJO в те же интервалы времени не было в течение 15 предыдущих лет, когда данная станция работала устойчиво. Не отмечено возрастания числа импульсов в записях других аналогичных станций, расположенных на расстояниях более 1700 км от эпицентра. Предполагается, что асимметричные импульсы порождены явлением дилатансии в приповерхностных слоях земной коры в районе станции MAJO.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмические станции, предвестники, импульсы, эпицентр.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201913-13>

ВВЕДЕНИЕ

После создания в 1990-х годах глобальной системы широкополосных сейсмических станций появился ряд исследований сейсмических шумов в диапазоне периодов 10^2 – 10^3 с. Авторы [Kobayashi, Nishida, 1998] объясняли возникновение таких колебаний следствием вариаций атмосферного давления. В работе [Ekstrom, 2001] было показано, что такого рода шумы существуют практически постоянно, в том числе в спокойные от сильных землетрясений промежутки времени. По-видимому, их генерация связана с перемещением и турбулентными движениями масс воздуха в атмосфере. Авторы [Satoshi et al., 2007] исследовали большой спектр так называемых “slow earthquakes” с периодами от нескольких десятков секунд до криповых подвижек, регистрируемых деформометрами и наклономерами. Разнообразная техника анализа низкочастотных сейсмических шумов была описана в работах [Sobolev, Lyubushin, 2007; Соболев и др., 2017]. Изучение динамики сейсмических шумов, предвещающих как землетрясения, так и вулканические извержения, было предметом ряда исследований [Кугаенко и др., 2017; Салтыков, 2017].

В работе [Соболев и др., 2014] был выполнен анализ сейсмического шума в диапазоне пе-

риодов от 40 до 360 с на основе записей широкополосных сейсмических станций системы IRIS при учете землетрясений и циклонов. Он привел к выводу, что на изменения уровня, структуры и спектра шумов влияют сеймотектонические условия расположения станций, т.е. существует литосферная составляющая. Кроме того, было показано, что низкочастотные колебания усиливаются перед некоторыми землетрясениями. Отмечались следующие их основные свойства. Колебания четче проявлялись на записях станций, расположенных в зоне субдукции; выделялись асимметричные импульсы длительностью в десятки и сотни секунд; отмечена синхронизация колебаний на станциях, близко расположенных к эпицентру будущего сильного землетрясения. Предполагалось, что природа колебаний связана с криповыми подвижками и возникающие импульсы регистрируются близко расположенными сейсмическими станциями.

В работе [Соболев, 2011] была исследована динамика сейсмических шумов в минутном диапазоне периодов по записям широкополосных станций IRIS перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. в Японии. Установлено, что дисперсия шума и количество импульсов многократно возросли за 1.5 месяца до землетрясения по данным станций,

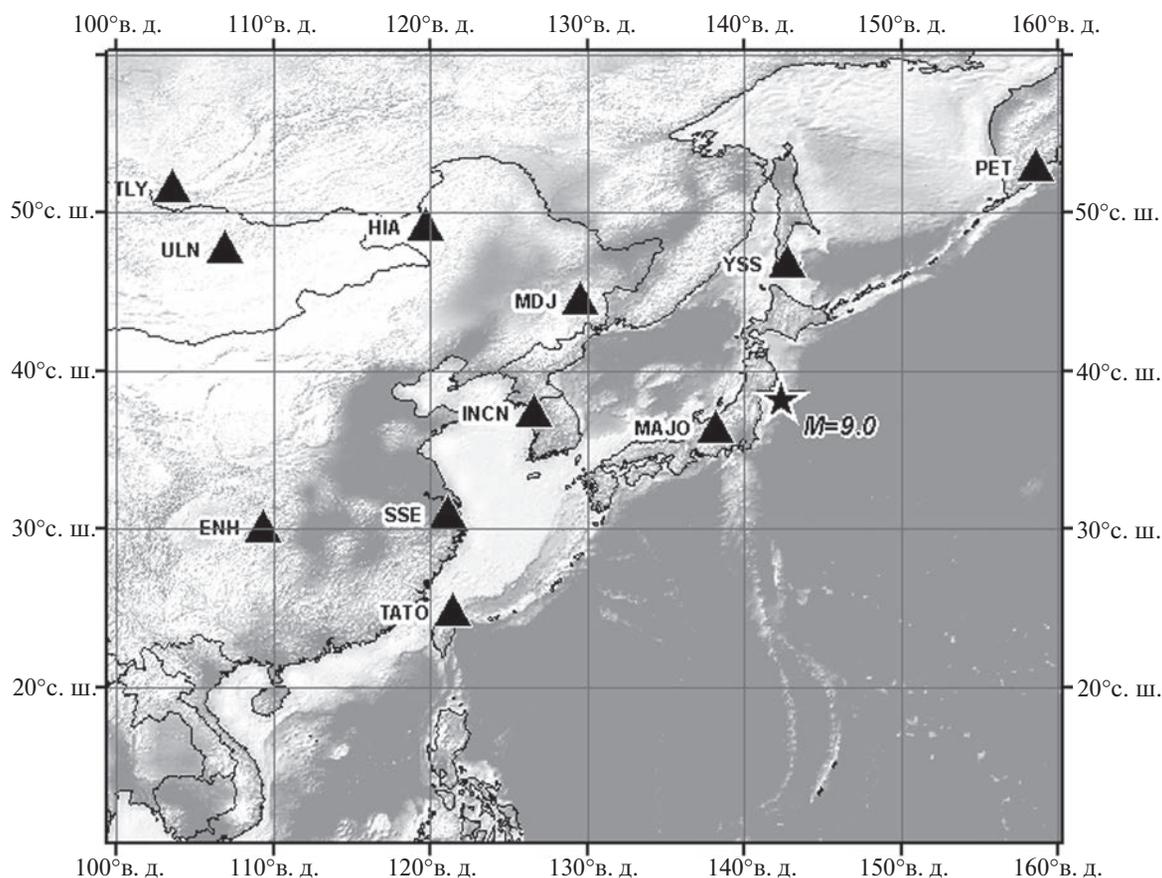


Рис. 1. Расположение широкополосных станций (треугольники), записи которых использованы при выделении асимметричных сейсмических импульсов перед землетрясением Тохоку (звездочка).

расположенных ближе 500 км от эпицентра землетрясения. Столь большого возрастания шума на этих станциях не обнаружено в те же интервалы года на протяжении последних 15 лет, когда начала устойчиво работать система IRIS. Не выявлено возрастания шума по записям станций, удаленных на расстояние более 1200 км от эпицентра. Уменьшение амплитуды аномального шума с увеличением расстояния от эпицентра землетрясения до соответствующих станций, по-видимому, означало, что его источники находились вблизи очага землетрясения. Структура шума включала как детерминированные, так и хаотические компоненты.

В настоящей работе исследуются формализовано выделенные одиночные асимметричные импульсы перед землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. с $M = 9.0$.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Экспериментальной базой исследования являлись записи скорости смещения постаментов сейсмических станций IRIS с частотой опроса 1 с. Установленные на этих станциях сейсмометры STS-1 обеспечивали надежную регистрацию

колебаний с периодами от 0.3 до 360 с. Данные были предоставлены корпорацией IRIS через систему ИНТЕРНЕТ. В настоящей работе мы использовали записи станций MAJO, PET, YSS, MDJ, INCN, SSE, TATO, ENH, HIA, ULN, TLY (рис. 1). Для прояснения некоторых вопросов о месте возникновения колебаний анализировались также записи станции OBN, находящейся в Европейской части России на расстоянии более 7000 км от землетрясения. Исходные данные охватывают интервал времени с 1 января 1996 г. до 11 марта 2011 г., когда вышеперечисленные станции IRIS функционировали устойчиво за исключением некоторых промежутков.

Продемонстрируем на рис. 2 методику выделения асимметричных импульсов в минутном диапазоне периодов на примере участка записи вертикальной компоненты станции MAJO за 14 февраля 2011 г. (22 суток до землетрясения Тохоку). График 1 показывает значения с дискретизацией 1 отсчет в секунду. В центре интервала видна запись удаленного землетрясения у берегов Чили с $M = 6.6$. В начале и конце интервала наблюдается возрастание микросейсм с периодами в несколько секунд при прохождении циклонов. Первый этап анализа

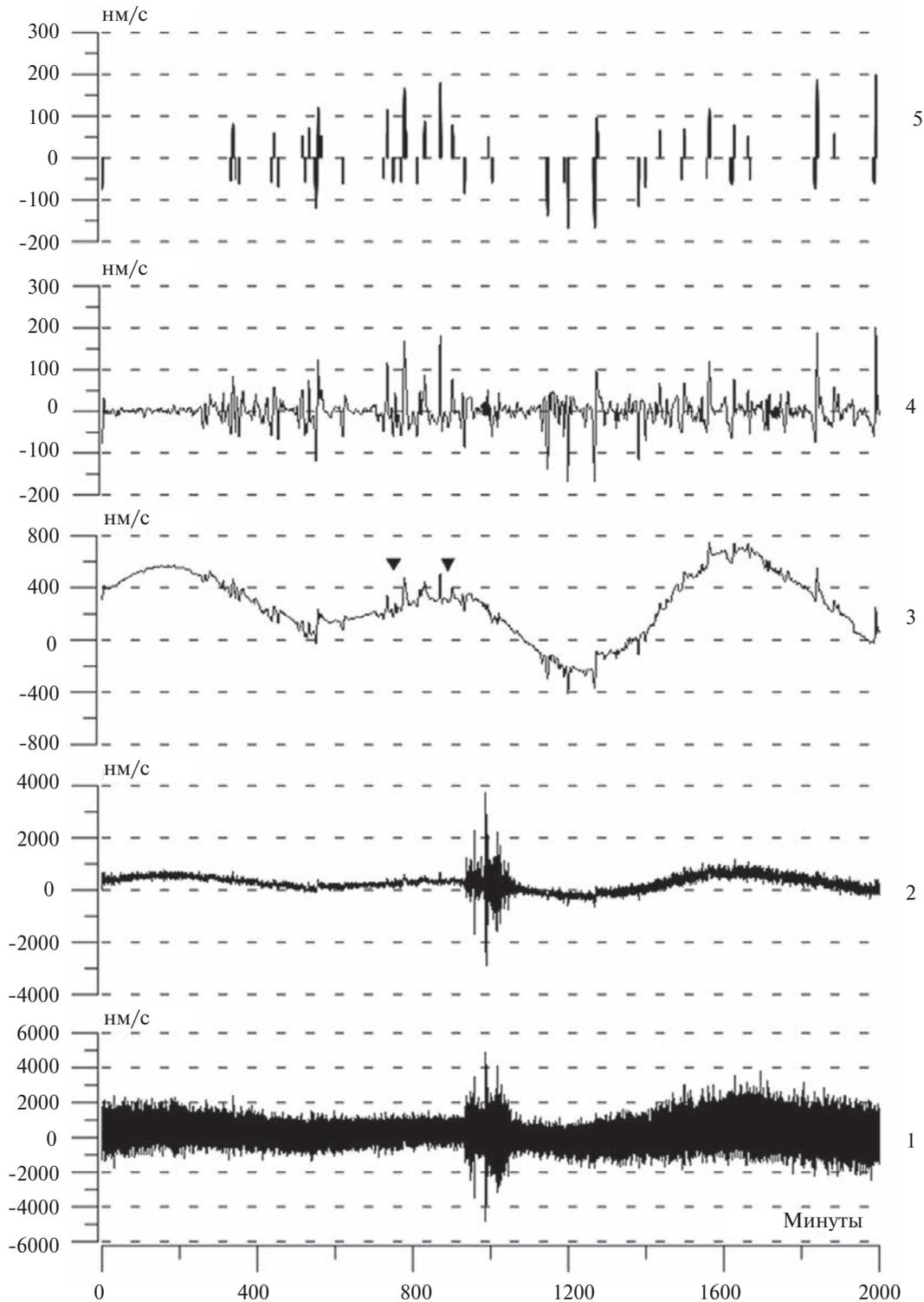


Рис. 2. Последовательные процедуры выделения асимметричных сейсмических импульсов на примере записи станции МАЮ 14 февраля 2011 г.

1 – дискретизация 1 отсчет в секунду (в центре – запись землетрясения в Чили с $M = 6.6$; в начале и в конце – увеличение шума в секундном диапазоне периодов при прохождении циклонов); 2 – после осреднения с окном 10 с; 3 – после высокочастотного фильтра Гаусса с ядром осреднения 10 отсчетов; 4 – после снятия тренда, вычисленного фильтром Гаусса с ядром осреднения 100 с; 5 – асимметричные импульсы положительной и отрицательной полярности выше порога по амплитуде ± 50 нм/с и разделенные по времени интервалами > 30 мин. Треугольниками отмечен интервал демонстрации формы импульсов (см. рис. 3) при более детальной развертке во времени.

заклучался в осреднении исходных 1-секундных данных окном 10 с. Результат представлен на графике 2. Шум в секундном диапазоне периодов уменьшился в среднем в 16 раз. В то же время, амплитуда записи удаленного землетрясения (в центре интервала) уменьшилась всего на 1/3. Следующим шагом было подавление вариаций секундного диапазона высокочастотным фильтром Гаусса с ядром осреднения $R = 10$ отсчетов [Hardle, 1989; Любушин, 2007]. В результате, на графике 3 землетрясение, практически, не просматривается. Здесь теперь проявляются импульсы, которые не видны на графике 1. Амплитуда наиболее значительных из них составляет ~ 300 нм/с и они еле заметно выделялись на графике 2. Стрелками на графике 3 обозначен интервал длительностью 133 мин, показанный на следующем рис. 3 для демонстрации структуры импульсов в более детальной развертке. Выбор именно этого интервала связан с тем, что он является обычным при отсутствии циклона и на нем проявлены типичные асимметричные импульсы. На графике 3 четко проявлены также длиннопериодные колебания продолжительностью ≈ 720 мин (12 часов), вызванные земным приливом. Следующая операция заключалась в устранении низкочастотного тренда, вычисленного фильтром Гаусса с ядром осреднения $R = 100$ отсчетов. Это было необходимо для разделения импульсов положительной и отрицательной полярности. Полученный ряд представлен на графике 4. Он позволяет сосчитать количество импульсов той и другой поляр-

ности при заданном пороге их амплитуды ΔA . Длительность большинства из показанных на графике 4 импульсов варьировала в пределах 3–6 мин. Амплитуда шума в промежутках между импульсами в среднем составляла ± 5 нм/с. Для численных оценок количества импульсов в последовательные временные интервалы был выбран порог их выделения по амплитуде на порядок превышающей уровень шума. Пример выделенных импульсов при амплитудном пороге $\Delta A = \pm 50$ нм/с представлен на графике 5. Кроме того, с целью исключения случайных выбросов в результате интерференции колебаний шума, при сопоставлении числа в различные годы и на разных станциях учитывались только импульсы, разделенные между собой интервалом времени не менее 30 мин, что в несколько раз превышало длительность отдельных импульсов.

Детальная структура отдельных асимметричных импульсов после усреднения в 10 раз исходных 1-секундных данных показана на рис. 3. Взят интервал в 133 мин, обозначенный стрелками на графике 3 рис. 2. Можно видеть, что время нарастания и спада амплитуды импульсов различается. В среднем, на статистике нескольких тысяч выделенных в данной работе импульсов время нарастания колебалось от 1 до 3 мин, и время спада – от 2 до 8 мин. Длительность импульсов составляла, таким образом, несколько минут, в связи с чем мы обозначаем их как импульсы минутного диапазона периодов.

На рис. 4 продемонстрирован результат выделения асимметричных импульсов по записям

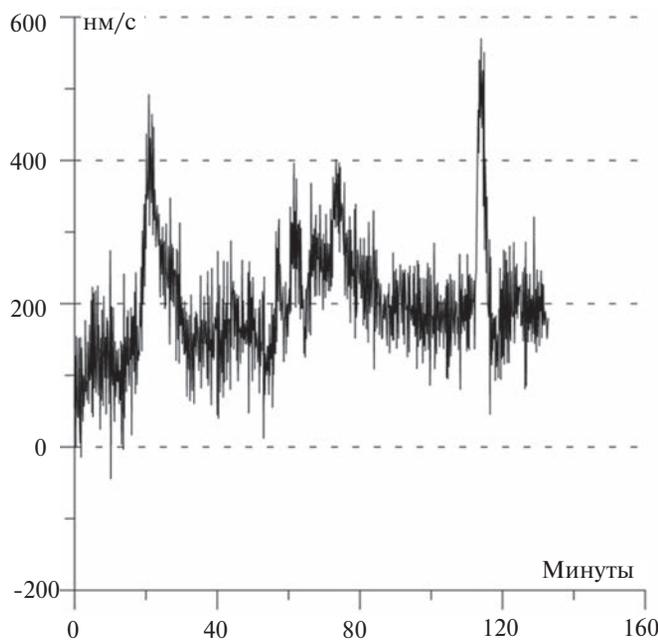


Рис. 3. Пример структуры асимметричных импульсов 14 февраля 2011 г. в интервале, обозначенном треугольниками (см. рис. 2).

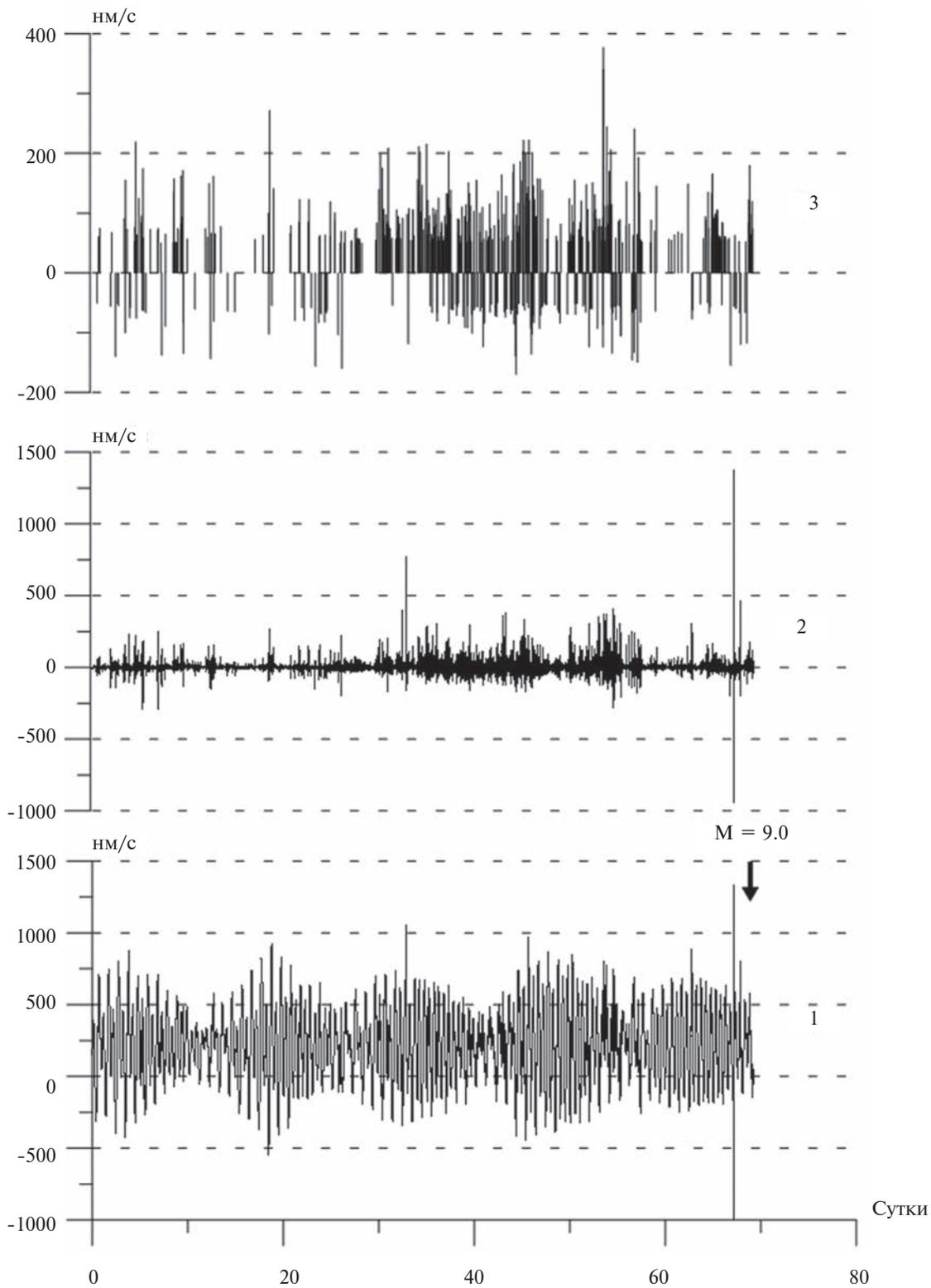


Рис. 4. Анализ записей станции МАЮ за период 1 января–11 марта 2011 г. (за 1 час до землетрясения Тохоку). 1 – после снятия колебаний секундного диапазона периодов фильтром Гаусса с ядром осреднения 10 с; 2 – после дополнительного снятия низкочастотного тренда, вычисленного фильтром Гаусса с ядром 100 отсчетов; 3 – асимметричные импульсы положительной и отрицательной полярности выше порога по амплитуде +/-50 нм/с и разделенные во времени интервалами >30 мин.

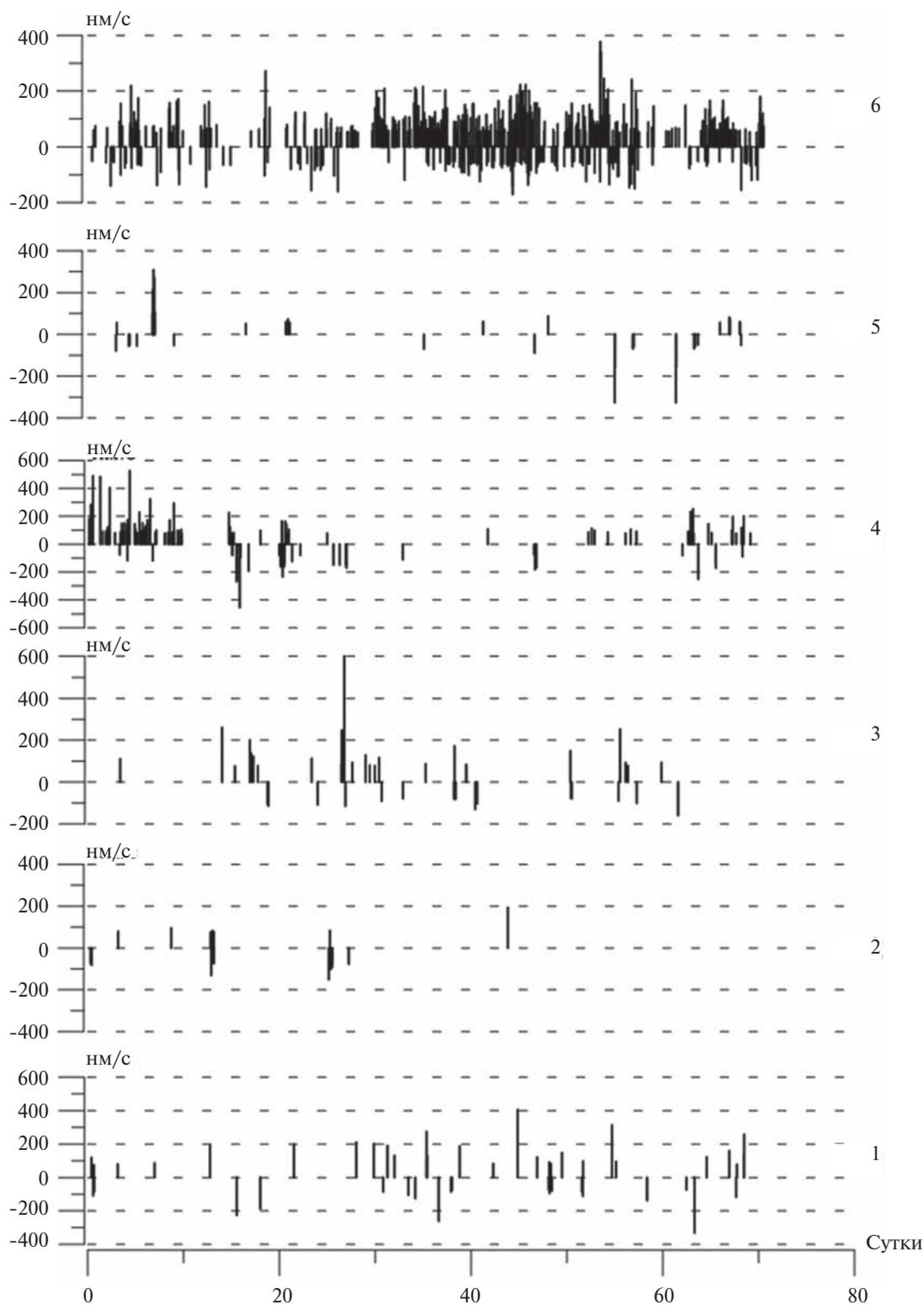


Рис. 5. Асимметричные импульсы в записях станции МАЮ за аналогичные интервалы времени 1 января–11 марта: 1 – 1996, 2 – 2001, 3 – 2008, 4 – 2009, 5 – 2010, 6 – 2011 гг.

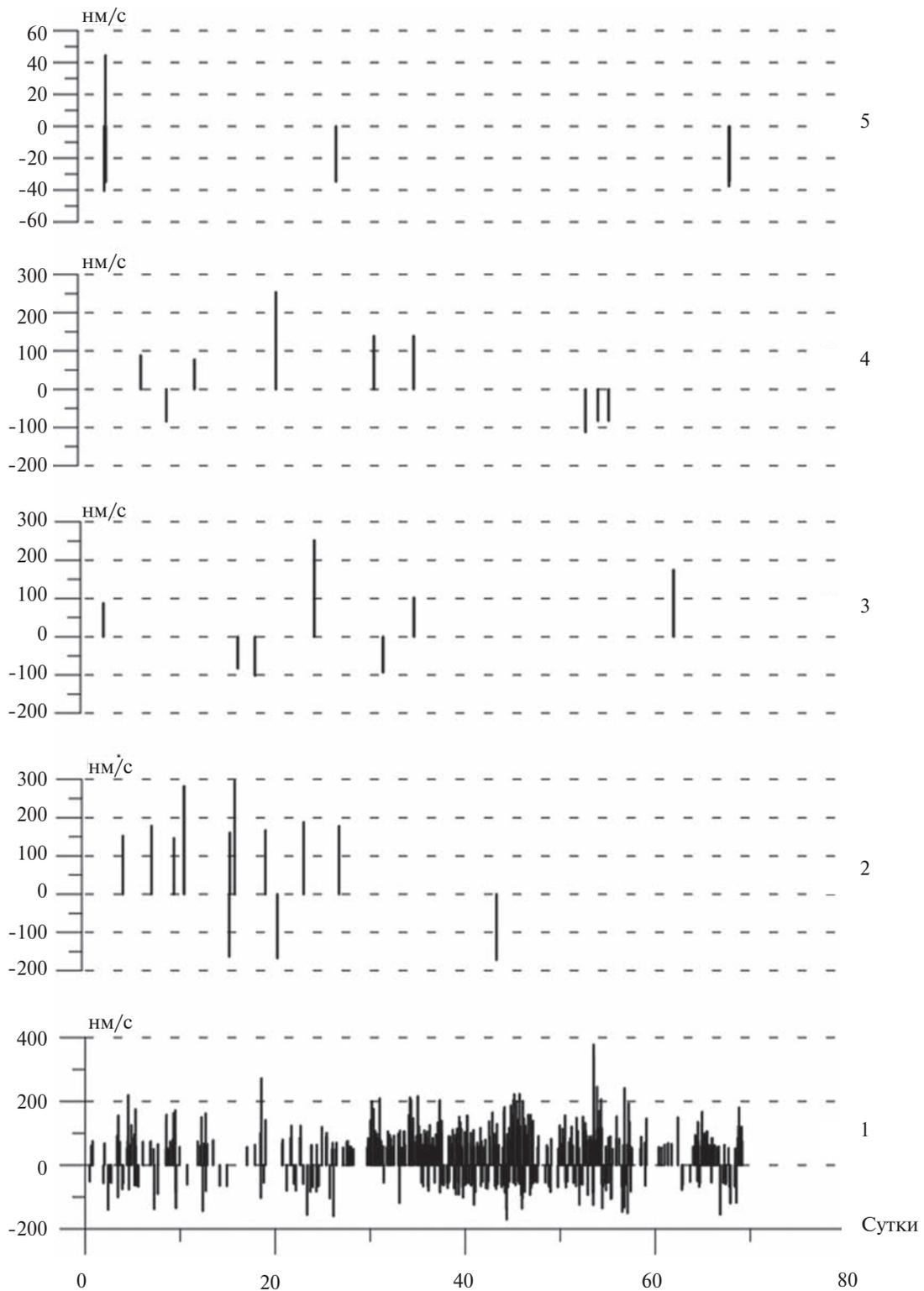


Рис. 6. Асимметричные импульсы в записях нескольких станций (см. рис. 1) за аналогичные интервалы времени 1 января–11 марта 2011 г.
 1 – МАЮ, эпицентральное расстояние $\Delta R = 400$ км; 2 – INCN, $\Delta R = 1400$ км; 3 – TATO, $\Delta R = 2600$ км; 4 – PET, $\Delta R = 2300$ км; 5 – MDJ, $\Delta R = 1280$ км.

вертикального канала станции MAJO перед землетрясением Тохоку в интервале 1 января–11 марта 2011 г. (69.3 суток). График 1 построен после снятия колебаний секундного диапазона периодов фильтром Гаусса (см. рис. 2, график 3). Исходные данные, такие как на графиках 1 и 2 рис. 2, не пригодны для демонстрации на столь длинном интервале из-за больших по амплитуде выбросов метеорологического, техногенного происхождения, а также местных и удаленных землетрясений. Примером является симметричный импульс за двое суток до землетрясения, вызванный форшоком с $M = 7.3$. На графике 1 прослеживаются полусуточные, суточные и двухнедельные колебания земных приливов. После их устранения низкочастотным фильтром Гаусса остаются импульсы, показанные на графике 2. Частота их возникновения увеличилась через 30 суток после 1 января 2011 г. Интервал интенсивного проявления импульсов длился в течение первого месяца. После 2 марта, т.е. за 8 суток до землетрясения, частота импульсов в единицу времени уменьшилась. На графике 3 оставлены только одиночные импульсы, разделенные интервалом > 30 мин, амплитуда которых превышала порог $\Delta A = \pm 50$ нм/с. Отметим, что большинство импульсов имело положительную полярность.

Следующим этапом была проверка, насколько часто проявляются асимметричные импульсы в записях станции MAJO в предыдущие годы. Аналогичным образом, как на рис. 4, были выделены импульсы в те годы, когда эта станция работала устойчиво. Выяснено, что ни разу не было такого сгущения импульсов, как на графике 3 рис. 4. В 1996, 2001, 2008, 2009 и 2010 гг. количество импульсов в интервалах с 1 января по 11 марта насчитывалось десятками, что отражено на графиках 1–5 рис. 5. В остальные годы выявлены одиночные импульсы. Сопоставление графиков 1–5 с графиком 6 убеждает, что аномальное возрастание частоты возникновения импульсов наблюдалось только в 2011 г. за 1.4 месяца до землетрясения Тохоку.

Проанализируем, насколько часто асимметричные импульсы появлялись в интервале 1 февраля–11 марта 2011 г. на других станциях (рис. 6). На рис. 1 были показаны соседние относительно MAJO и устойчиво работавшие станции. Также как и для станции MAJO, записи нормированы на чувствительность соответствующей станции, что позволяет сопоставлять амплитуды импульсов. Чувствительность бралась из базы данных “SeismiQuery BREQ_FAST Request Form – IRIS.url”. Отдельные импульсы отмечены на станциях INCN (график 2), TATO (график 3), PET (график 4), расположенных в зоне субдукции или вблизи нее. Шум в записях расположенной

на континенте станции MDJ был в 5 раз меньше по сравнению со станциями в зоне субдукции. Соответственно, и асимметричные импульсы характеризовались меньшей амплитудой, что выражено в масштабе шкалы ординат. Столь явного преобладания импульсов положительной полярности, как на станции MAJO (график 6), не просматривается. В записях станций, находящихся на Азиатском континенте, в том числе к востоку от показанных на рис. 1, асимметричных импульсов, превосходящих порог шума хотя бы в 5 раз, не обнаружено. Отметим, что в записях станции YSS 2 февраля 2011 г. после большой помехи произошло возрастание шума и увеличение числа импульсов, длившееся до 9 марта, когда случилась аналогичная большая помеха. Мы относим этот эффект к техногенным шумам и не имеем достаточных оснований связывать его с подготовкой землетрясения Тохоку.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перечислим основные свойства проявления асимметричных сейсмических импульсов перед землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. В записях станции MAJO, расположенной в центре о. Хонсю на эпицентральной расстоянии $R = 400$ км, в интервале с 1 января по 11 марта 2011 г. серия импульсов возникла в конце января 2011 г. и продолжалась в течение февраля до начала марта (см. рис. 4). Она состояла из сотен единичных импульсов, превышающих по амплитуде в 10 и более раз уровень фона и разделенных между собой промежутками не менее 30 мин. За предыдущие 15 лет, с того времени, когда эта станция начала устойчиво работать (с 1996 г.), в те же интервалы времени с 1 января по 11 марта ни разу не возникали подобные серии; число импульсов не превышало, первых десятков в 1996, 2001, 2008–2010 гг. (см. рис. 5) и составляло единицы в другие годы. В записях станций, расположенных на эпицентральных расстояниях от 1400 до 2600 км, число асимметричных импульсов в интервале 1 января–11 марта 2011 г. не превышало нескольких десятков (см. рис. 6, графики 3–5) и не отмечено их сгущения в феврале, как на станции MAJO. В записях расположенных на континенте станций асимметричных импульсов, превышающих фон даже в 5 раз, не выявлено. Главной задачей настоящей работы было изучить эффект появления асимметричных сейсмических импульсов перед мега землетрясением Тохоку. Естественно, возникает вопрос, как ситуация изменилась после данного землетрясения. Это может быть предметом дальнейшего специального исследования. Здесь мы только укажем, что после даты землетрясения 11 марта 2011 г. на записях стан-

ции МАЮ в течение марта регистрировались тысячи импульсов в основном положительной полярности. Ситуация изменилась в середине апреля, когда на фоне убывающей интенсивности потока импульсов стали преобладать события отрицательной полярности. В мае импульсы той и другой полярности регистрировались примерно в равном количестве.

Отмеченные в двух предыдущих абзацах факты дают возможность предположить, что возникновение асимметричных импульсов в феврале 2011 г. связано с подготовкой землетрясения Тохоку. При обсуждении их природы надо учесть следующее обстоятельство. Они четко проявлялись на записях вертикальных каналов станций. Анализ вариаций горизонтальных компонент показал, что уровень шума в единицах нм/с примерно в 5 раз превышает уровень вертикального канала. Это не позволило надежно выделять отдельные импульсы. Однако, выяснилось, что в тех случаях, когда импульсы на горизонтальных каналах совпадали во времени с импульсами на вертикальном канале, формы их записи отличались и синхронность возникновения была не лучше нескольких секунд. Исходя из этого обстоятельства, мы приходим к выводу, что импульсы не могут быть объяснены синхронными вертикальными и горизонтальными движениями постаumenta станции.

Вертикальный канал широкополосной станции с вариометром STS-1 подвержен влиянию изменений силы тяжести, влияющей на пружину маятника [Рыков, 1979; Wieland, Streckeisen, 1982]. Подтверждением этому является регистрация земных приливов (см. рис. 4, график 1). Величина вертикального перемещения поверхности Земли приливного происхождения варьирует в диапазоне 400 мм, что соответствует изменению ускорения силы тяжести в 200 мкГал [Мельхиор, 1968]. Асимметричные импульсы, как на рис. 3, характеризуются величинами порядка 300 нм/с. Вычисление амплитуды подъема земной поверхности в результате интегрирования по времени одного асимметричного импульса дает значение ~ 5 мкм или $2.5 \cdot 10^{-3}$ мкГал. Такая величина лежит ниже реальной избирательной способности современных гравиметров. Кроме того, нам не известно наличие рядов гравитационных наблюдений на уровне долей мкГал с частотой опроса хотя бы 1 отсчет в минуту. Это не позволяет сопоставить обсуждаемый эффект с вариациями гравитационного поля.

В связи с этим рассмотрим чисто гипотетически и на качественном уровне возможные причины возникновения перед землетрясением Тохоку асимметричных сейсмических импульсов в минутном диапазоне периодов. Предположим, что это есть результат изменения силы тяжести

вследствие уменьшения плотности массива горных пород под станцией. Одной из причин может быть развитие процесса дилатансии, что предполагается в дилатантно-диффузной модели (ДД) появления предвестников землетрясений [Scholz et al., 1973]. Теоретические расчеты показывают [Алексеев и др., 2001], что область приповерхностной дилатансии во много раз превышает размер очага землетрясения. Станция МАЮ удалена на 400 км от эпицентра землетрясения Тохоку с длиной разрыва ≈ 300 км, и развитие под ней дилатансии допустимо. Дилатансия в горных породах есть процесс неупругого увеличения объема горных пород при их сдвиговой деформации и по данным лабораторных экспериментов уменьшение плотности достигает $\approx 1\%$ [Brace et al., 1966]. В работах [Салтыков, Кугаенко, 2012; Марапулец и др., 2012] авторы рассматривали дилатансию как одну из причин вариаций сейсмической эмиссии перед землетрясениями Камчатки. Из рис. 3 следует, что длительность импульса, записанного как изменение скорости вертикального перемещения грунта, составляет несколько минут. Соответственно, столько же длится процесс нарастания вертикальной подвижки в месте расположения станции. Мы не знаем скорости гипотетического образования областей дилатансии. В принципе, она должна быть не меньше скорости передачи информации от одной к другой точке горной породы через механические напряжения; т.е. несколько км/с. Соответственно, длительность нарастания асимметричного сейсмического импульса в течение минуты не противоречит представлению о развитии под сейсмической станцией области дилатансии размером в десятки км. Следует подчеркнуть, что в результате дилатансии горная порода осушается, что должно сказаться на вариациях силы тяжести. Отметим, что, несмотря на теоретическое обоснование возникновения дилатансии в приповерхностных слоях земли перед землетрясениями [Алексеев и др., 2001], прямых доказательств не получено.

Вторая гипотетическая причина возникновения обсуждаемых в настоящей работе сейсмических импульсов может быть рассмотрена в рамках флюидометаморфогенной модели очага землетрясения [Родкин, 2004]. Землетрясение подготавливается ускорением метаморфических превращений в некоторой напряженной области, где происходят медленные подвижки. Процесс протекает через серию последовательных разрушений жестких включений при активной роли жидкости. Предполагается существование эпизодов деформаций с разными скоростями вплоть до диапазона “медленных” землетрясений, не регистрируемых стандартными сейсмографами. Обсуждаемые в настоящей работе сейсмиче-

ские импульсы в минутном диапазоне периодов лежат в этой категории. Если вблизи станции МАЮ перед землетрясением Тохоку проводились гидрогеологические наблюдения, то их анализ помог бы выяснению природы описанных в настоящей работе асимметричных импульсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа сейсмического шума в минутном диапазоне периодов, регистрируемого широкополосными сейсмическими станциями, установлено, что за 1.4 месяца до землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г. с магнитудой 9 в записях расположенной на удалении 400 км от эпицентра станции МАЮ проявлены сотни сейсмических импульсов.

Импульсы имели асимметричную форму преимущественно положительной полярности.

Такого явления не обнаружено в записях данной станции в те же интервалы года за предыдущие 15 лет, когда станция начала устойчиво функционировать.

На более удаленных станциях, как в зоне субдукции, так и на Азиатском континенте в те же интервалы года увеличения числа импульсов не отмечено.

Выдвинуто предположение, что природа возникновения асимметричных импульсов связана с развитием дилатансии в приповерхностных слоях земной коры или ускорением метаморфических превращений в рамках флюидометаморфогенной модели очага землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е.* О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности // Вычислительная сейсмология. Вып. 32. М.: ГЕОС, 2001. С. 81–97.
- Кугаенко Ю.А., Павлов В.М., Иванова Е.И и др.* Толудская вспышка сейсмичности и землетрясение 30.11.2012 г. ($M_C = 5.4$, $M_W = 4.8$), сопровождавшие начало Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 33–48.
- Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
- Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А. и др.* Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 59–67.
- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 454 с.
- Родкин М.В.* Изменение характера сейсмичности с глубиной: новые эмпирические соотношения и их интерпретация // Физика Земли. 2004. № 10. С. 63–72.
- Рыков А.В.* К проблеме наблюдений колебаний Земли. Аппаратура, методы и результаты сейсмометрических наблюдений // Сейсмические приборы. 1979. Вып. 12. С. 3–8.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А.* Развитие приповерхностных зон дилатансии как возможная причина аномалий в параметрах сейсмической эмиссии перед сильными землетрясениями // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 96–106.
- Салтыков В.А.* О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // Физика Земли. 2017. № 2. С. 84–96.
- Соболев Г.А.* Низкочастотный сейсмический шум перед землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. с магнитудой 9 // Физика Земли. 2011. № 12. С. 11–22.
- Соболев Г.А., Соболев Д.Г., Мигунов И.Н., Закржевская Н.А.* Некоторые свойства низкочастотного сейсмического шума // Физика Земли. 2014. № 4. С. 15–24.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Соболев Д.Г., Петров В.А.* Проявление триггерного эффекта в региональной сейсмичности // Вулканология и сейсмология. 2017. № 2. С. 3–13.
- Brace W.F., Paulding B.W., Scholz C.H.* Dilatancy i the fracture of crystalline rocks // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P. 3939–3948.
- Ekstrom G.* Time domain analysis of Earth's long-period background seismic radiation // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № B11. P. 26483–26493.
- Hardle W.* Applied nonparametric regression. Cambridge, N. Y., New Rochell, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 1989. (Русский перевод: Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М.: Мир, 1993. 349 с.).
- Kobayashi N., Nishida K.* Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances // Nature. 1998. V. 395. P. 357–360.
- Satoshi Ide, Beroza G.C., Shelly D.R., Uchide T.* A scaling law for slow earthquakes // Nature. Letters. 2007. V. 447/3. P. 76–79.
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwall Y.P.* Earthquake prediction: a physical basis // Science. 1973. V. 181. P. 803–810.
- Sobolev G.A., Lyubushin A.A.* Using modern seismological data to reveal earthquake. Precursors // Russian Journal of Earth Sciences. 2007. V. 9. ES 2005. doi: 10.2205/2007ES000220.
- Wieland E., Streckeisen G.* The leaf-spring seismometer – design and performance // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1982. V. 72. P. 2349–2367.

**ASYMMETRICAL SEISMIC PULSES
BEFORE A LARGE EARTHQUAKE****G. A. Sobolev*, N. A. Zakrzhevskaya, and S. M. Kireenkova***Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
ul. Bol'shaya Gruzinskaya 10, str. 1, Moscow, 123242 Russia**e-mail: sobolev@ifz.ru*

Received November 21, 2017

This study is concerned with the behavior of seismic noise in the period range of a few minutes based on records made by broadband IRIS stations before the catastrophic earthquake of March 11, 2011 in Japan. A formalized technique was used to identify discrete asymmetrical pulses whose amplitudes were an order of magnitude higher than the noise level and that were spaced at intervals longer than 30 minutes. The frequency of pulses at the MAJO station on Honshu 400 km of the earthquake epicenter increased on January 30, 2011 and remained high until March 2, 2011. No such phenomena have been observed at MAJO in the same periods during the preceding 15 years, when the station was in regular operation. The records of other similar stations farther than 1700 km from the epicenter were not found to contain increases in the rate of pulses. We believe that these asymmetrical pulses were due to dilatancy in shallow crustal layers beneath the MAJO station.

Key words: earthquake, seismic stations, forerunners, pulses, epicenter.