

УДК 550

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПОДВИЖКИ В МИНУТНОМ ДИАПАЗОНЕ ПЕРИОДОВ ПЕРЕД КАТАСТРОФИЧЕСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ В ЯПОНИИ 11 МАРТА 2011 г.

© 2024 г. Г. А. Соболев^а, И. Н. Мигунов^{а,*}

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

* e-mail: inmig@mail.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 08.08.2023 г.

Принята к публикации 20.10.2023 г.

Исследованы записи скорости вертикального перемещения земной поверхности возле широкополосных сейсмических станций, расположенных вокруг эпицентра землетрясения Тохoku 11.03.2011 г. с магнитудой 9. На протяжении 15 лет перед землетрясением ближайшая к эпицентру и удаленная от него на 386 км станция МАJO записывала устойчивый суточный ход сейсмического шума. В 2009 г. обнаружены превышающие 10% суточного хода импульсы с постепенным нарастанием и последующим спадом амплитуды колебаний длительностью в несколько минут. Они возникали при спокойных метеорологических условиях и геомагнитной активности. На станциях, удаленных от эпицентра более чем на 700 км, эти импульсы не проявились. Предполагается, что перед землетрясением происходили подвижки в литосфере Японии и прилегающей части Тихого океана.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмические станции, тектонические деформации, метеорологические условия

DOI: 10.31857/S0203030624010028, EDN: PZPIIJ

ВВЕДЕНИЕ

После создания в 1990-х гг. глобальной системы широкополосных сейсмических станций системы IRIS возник ряд исследований сейсмических шумов в минутном диапазоне периодов. В работе [Nishida et al., 2002] рассматривалась гипотеза возникновения таких шумов вследствие турбулентных движений в атмосфере. В альтернативной гипотезе [Tanimoto et al., 1998] предполагалось, что шумы возбуждаются множественными слабыми землетрясениями, которые находятся ниже порога чувствительности сейсмических станций. В этих и других исследованиях [Ekstrom, 2001] было выяснено, что шумы в таком диапазоне существуют постоянно, в том числе и в спокойные от землетрясений интервалы времени. В работе [Соболев и др., 2005] было показано, что колебания усиливаются перед некоторыми землетрясениями с магнитудами >7.5 . Предполагалось, что

природа шума связана с криповыми подвижками возле постаментов станций. Некоторые наши исследования низкочастотного сейсмического шума касались землетрясения Суматра 26.12.2004 г. с магнитудой 9.1. При анализе записей станций, расположенных вокруг эпицентра землетрясения Суматра было выяснено, что на протяжении 5 лет с 1996 по 2000 гг. ближайшая к эпицентру и удаленная от него на 1700 км станция СОСО записывала устойчивый суточный ход сейсмического шума. В 2001 г. появились искажающие суточный ход импульсы с постепенным нарастанием и последующим спадом амплитуды колебаний длительностью в несколько минут. Они возникали при спокойных метеорологических условиях и геомагнитной активности. На станциях, удаленных от эпицентра более чем на 2000 км, эти импульсы не проявились. Было высказано предположение [Соболев, Мигунов, 2023], что

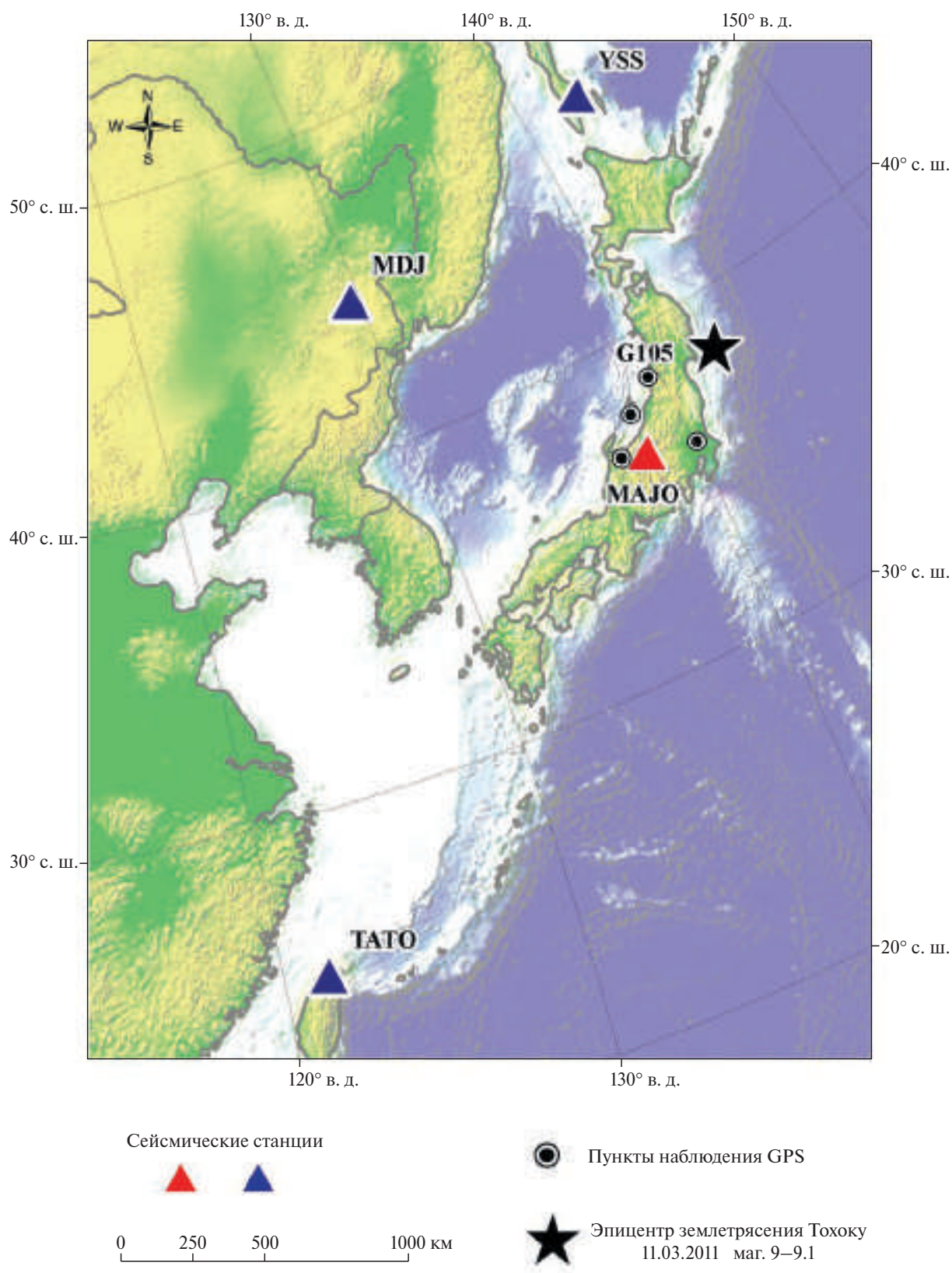


Рис. 1. Сейсмические и метеорологические станции, данные которых использованы в настоящей работе.

перед землетрясением происходили подвижки в геологических разломах литосферы Индийского океана.

Перед вторым по энергии после Суматринской катастрофы землетрясением в Японии с магнитудой 9 были обнаружены аномалии в некоторых параметрах низкочастотного сейсмического шума, послужившие А.А. Любушину основой для оправдавшегося среднесрочного прогноза [Любушин, 2012]. Там также наблюдались импульсные возмущения сейсмического шума. В работе [Соболев, 2011] было показано, что они возникали в массовом порядке за 1.5 месяца перед главным толчком. Для их выделения применялась методика ядерного усреднения [Hardle, 1989; Любушин, 2007]. Спектры длительности отдельных импульсов лежали в диапазоне 100–300 с. В настоящей работе для выявления импульсов мы используем только приведение 1-секундных исходных данных к минутным значениям путем усреднения и покажем, что столь простая процедура позволяет все же выделить аномальные вариации шума перед землетрясением Тохоку на фоне земных приливов.

МЕТОДИКА

Из базы GSNet_152.dat взяты данные станций, расположенных вокруг эпицентра землетрясения (рис. 1). Мы изучали ежесекундные записи широкополосных сейсмических станций IRIS, оснащенных сейсмометрами STS-1, позволяющими исследовать при одной и той же чувствительности колебания в диапазоне 0.2–360 с [Wieland, Streckeisen, 1982]. Канал LHZ каждой станции регистрирует вертикальную скорость смещения грунта V . Ближайшая к очагу станция МАЮ расположена на расстоянии 386 км от эпицентра (Station IU МАЮ, Matsushiro, Japan). Сейсмометр установлен на коренных породах о. Хонсю на высоте 405 м от уровня моря в штольне под сопкой. Это, практически, исключает влияние на него ветра и влаги при дожде. В штольне поддерживается постоянная температура.

Для сопоставления записей широкополосных сейсмических станций с вариациями земных приливов мы использовали последовательность действий, описанных ниже на примере станции МАЮ за 06 января 2007 г. (рис. 2). График 1

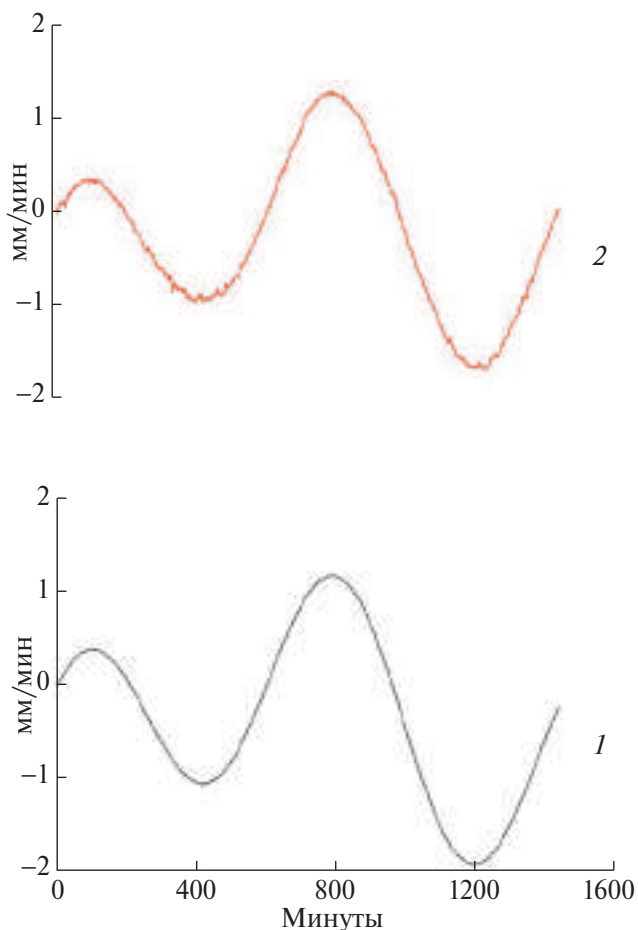


Рис. 2. Сопоставление теоретического земного прилива (1) с его значениями по данным сейсмической станции МАЮ (2).

представляет ежеминутные значения скорости изменения высоты теоретически вычисленного для координат станции МАЮ земного прилива. Применена программа PETGTAB [Wenzel, 1999]. График 2 демонстрирует вариации колебаний по сейсмологическим данным. Исходные ежесекундные данные получены по системе ИНТЕРНЕТ (<http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/forms/breqfast-request>) и усреднены до минутных величин. Шкала сейсмических данных приведена нормировкой к такой же для значений прилива. Коэффициент корреляции значений графиков 1 и 2 составляет 0.99. Это свидетельствует о возможности использования записей широкополосных сейсмических станций для изучения вариаций земных приливов в минутном диапазоне периодов.

Начиная с 2007 г. в записях станции МАЮ стали появляться однополярные импульсы с амплитудой больше 10% от размаха приливных

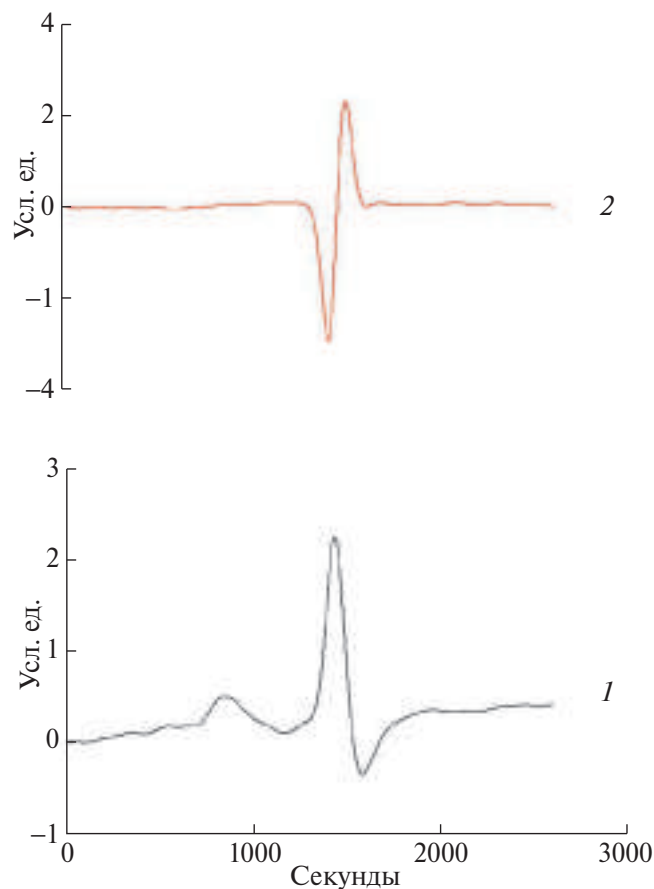


Рис. 3. Форма сейсмических импульсов, записанных сейсмографом STS-1 (1) и сейсмографом STS-2 (2) перед землетрясением Тохоку.

колебаний. Пример такого импульса 2 февраля 2007 г. показан на графике 1 рис. 3. Его длительность составляет примерно 300 с, и он четко прописывается сейсмометром STS-1, плоская амплитудно-частотная характеристика которого простирается от 0.2 с до 360 с. В апреле 2006 г. на станции МАЮ был установлен еще сейсмограф STS-2 с полосой пропускания до 100 с. Он воспроизводит более низкочастотные импульсы типа графика 1 с искажениями, что видно на графике 2. Но одновременное появление сигналов на двух приборах указывает, что сигналы не вызваны аппаратными погрешностями какого-то сейсмографа.

Более детально форма импульса от сейсмометра STS-1 представлена на рис. 4 (график 1). Это – скорость колебаний V . Интегрирование по времени указывает на форму и величину вертикального перемещения грунта SV (график 2). Величина SV составляет примерно 10% от полусуточных и суточных колебаний земных

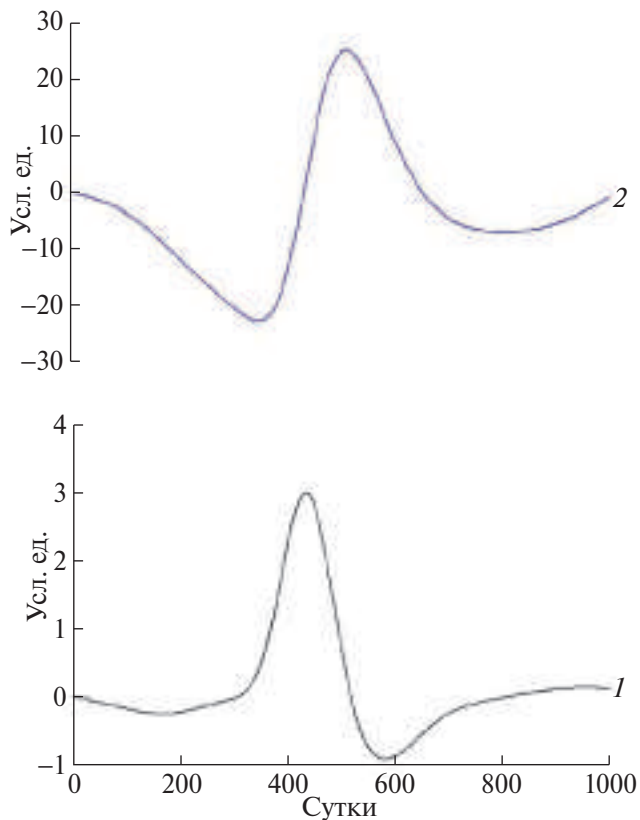


Рис. 4. Сопоставление скорости вертикального движения грунта V (1) и абсолютных значений SV (2) после его интегрирования в сейсмическом импульсе перед землетрясением Тохоку.

приливов. Этот импульс не отмечается в записях более удаленных от эпицентра станций ТАТО (2500 км), YSS (720 км) и MDJ (1100 км) (см. рис. 1). Только импульсы типа показанного на графике 1 рис. 4, учитывались при анализе их величины и времени возникновения. Бралась импульсы с величиной $\geq 10\%$ от амплитуды прилива. При этом в каждом году изучались интервалы с 1 января по 10 марта с учетом того, что землетрясение Тохоку произошло 11 марта 2011 г. Такой выбор позволял избегать возможного влияния мощных тропических циклонов, достигавших японских островов [Соболев, Закржевская, 2012]. Кроме того, уменьшалось влияние сезонных вариаций, которые проявляются при изменении влажности горных пород [Смирнов и др., 2017].

Просмотр записей МАЮ показал, что в интервалах от начала установки станции и до 2006 г. таких импульсов не было. В 2007 г. их было 6, в 2008 г. – 4. В 2009 и 2010 гг. импульсы появлялись более часто (рис. 5), а в 2011 г. их

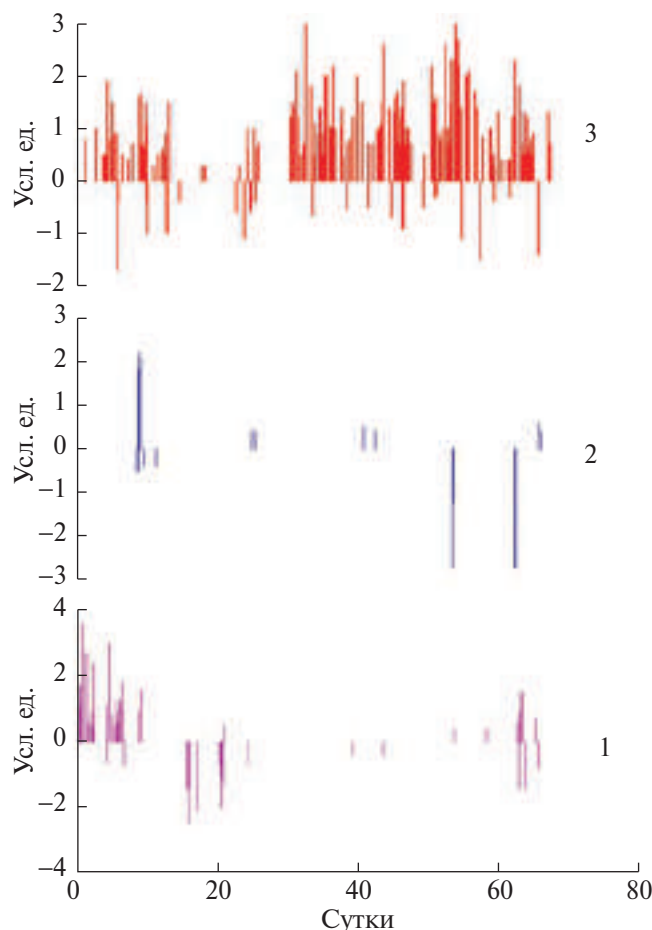


Рис. 5. Появление сейсмических импульсов перед землетрясением Тохоку в интервале 1 января – 10 марта в 2009 г. (1), 2010 г. (2) и 2011 г. (3).

возникновение шло в массовом порядке. Особенно интенсивным был этот процесс в феврале 2011 г. Большинство импульсов имело положительную полярность. Однако мы не можем исключить смену полярности импульса в зависимости от удаленности его источника от станции МАЮ.

Для выяснения возможной природы импульсов были исследованы погодные условия в районе станции МАЮ, так как ранее было показано [Соболев и др., 2022], что такого типа сигналы возникают, например, при выпадении дождя. На рис. 6, 7, 8 приведены сведения за 68 дней (с 1 января по 10 марта) по атмосферному давлению, выпадению осадков и скорости ветра на метеорологической станции MATSUMOTO [36.14 с.ш., 137.58 в.д.]. Она расположена на расстоянии менее 10 км от МАЮ. В 2009 г. (см. рис. 6) было 2 дня

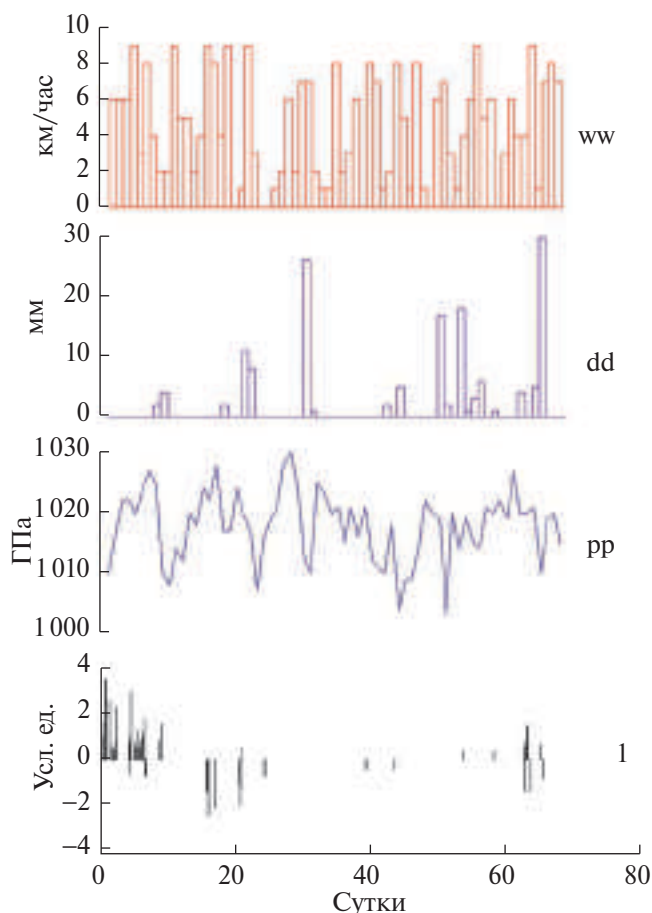


Рис. 6. Сопоставление времен появления сейсмических импульсов на станции МАЮ (1) с вариациями атмосферного давления pp, количества выпадения осадков dd и скорости ветра ww на близлежащей метеообсерватории в интервале 1 января – 10 марта 2009 г.

с большим количеством осадков: 30 января и 6 марта. В течение первого из них импульсов вообще не было (график 1), а во втором случае импульсы появились за сутки до выпадения дождя. В 2010 г. большие по амплитуде импульсы произошли практически в дни без осадков. Обильное выпадение осадков 7 февраля 2011 г. (см. рис. 8) не вызвало увеличения числа импульсов. Метеоданные по другим близко расположенным станциям SUWA [36.02 с.ш., 138.06 в.д.], NAGANO [36.39 с.ш., 138.11 в.д.], TAKAYAMA [36.09 с.ш., 137.15 в.д.], TOYAMA [36.42 с.ш., 137.12 в.д.] подтвердили выводы по станции MATSUMOTO.

Еще одним природным явлением, способным вызвать сейсмические импульсы, является магнитная буря. В работе [Соболев и др., 2020]

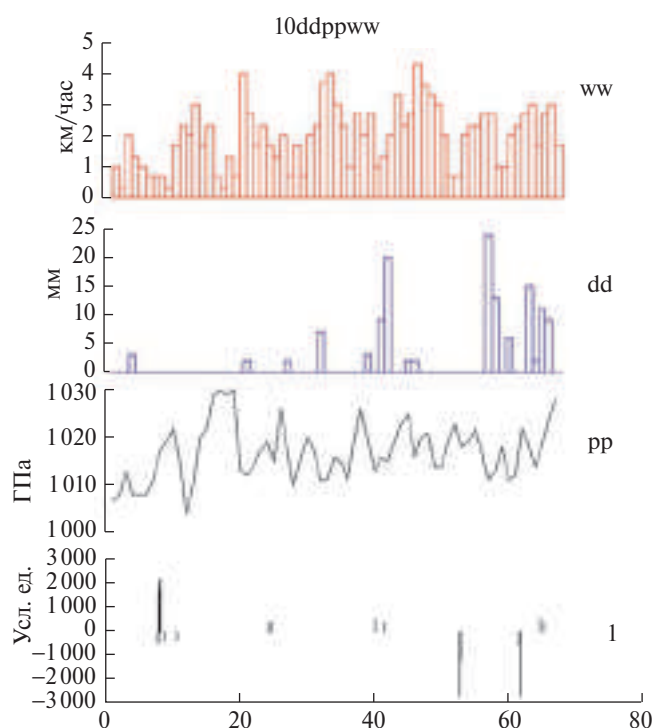


Рис. 7. Сопоставление времен появления сейсмических импульсов на станции МАЮ (1) с вариациями атмосферного давления pp, количества выпадения осадков dd и скорости ветра ww на близлежащей метеообсерватории в интервале 1 января–10 марта 2010 г.

было показано, что импульсы длительностью в несколько минут возникают практически сразу после резких изменений напряженности магнитного поля на всех континентах. В связи с этим мы проверили уровень геомагнитной активности в интервалах 1 января – 10 марта 2009, 2010, 2011 гг. Сведения о сильных магнитных бурях получены из архива <http://www.spaceweatherlive.com>. В таблицах архива приведены значения планетарных Kp-индексов – отклонений магнитного поля Земли от нормы в течение трехчасовых интервалов соответствующих суток (GFZ Potsdam official Kp-index). Значения Kp-индексов лежат в диапазоне от 0 до 9. Если они превышают величину 5, то такая активность рассматривается как магнитная буря. На рис. 9 графики 2, 4, 6 показывают уровень магнитной возмущенности во время вышеуказанных интервалов анализа импульсов

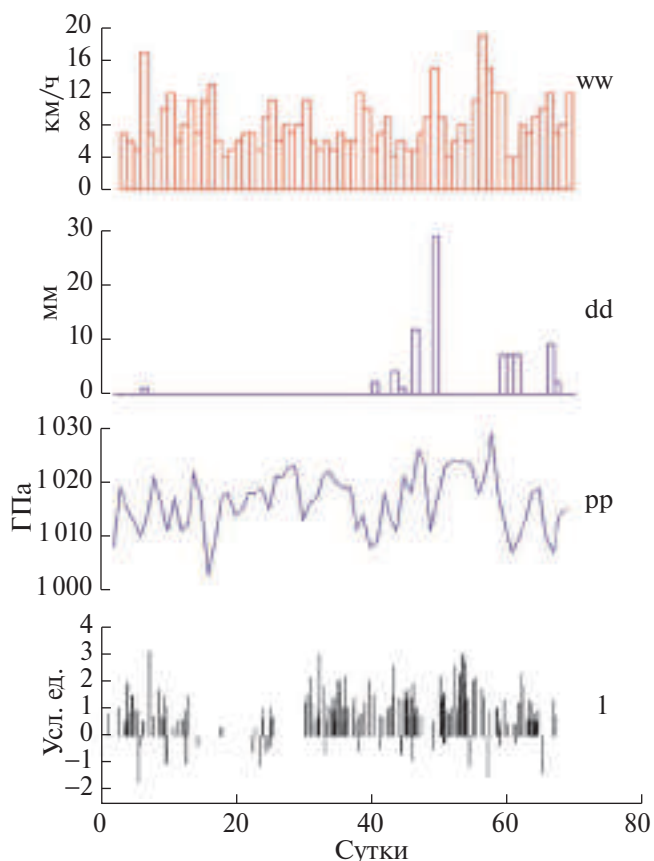


Рис. 8. Сопоставление времен появления сейсмических импульсов на станции МАЮ (1) с вариациями атмосферного давления pp, количества выпадения осадков dd и скорости ветра ww на близлежащей метеообсерватории в интервале 1 января – 10 марта 2011 г.

в 2009, 2010 и 2011 гг. (графики 1, 3, 5). В целом, геомагнитная активность, во всех исследованных интервалах была не высокой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В Японии существует сеть геодезических измерений GPS, включающая несколько тысяч наблюдательных пунктов [http://geodesy.unr.edu/gps_timeseries/tenv3/IGS14/], (Blewitt, Hammond, Kreemer, 2018). Значительное количество таких пунктов было установлено в 2006 г. и увеличено в 2009 г. Это дало возможность сопоставить времена возникновения вышеописанных импульсов с движениями на поверхности Земли. Мы выбрали несколько пунктов, расположенных вокруг сейсмической станции МАЮ; их местоположение показано на рис. 1. Сопоставление выполнено для тех же интервалов 1 января – 10 марта 2009, 2010, 2011 гг. Наибольшее

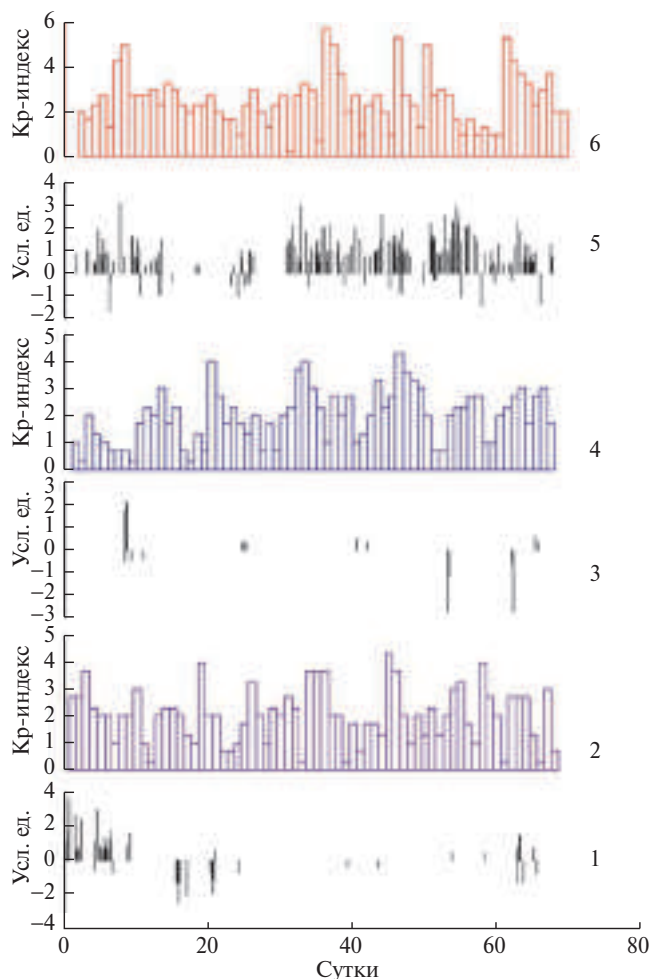


Рис. 9. Сопоставление времен появления сейсмических импульсов на станции МАЮ (1) в интервале 1 января – 10 марта 2009 г. (1), 2010 г. (3), 2011 г. (5) с уровнем геомагнитной активности (Кр-индексы) в те же временные интервалы (2, 4, 6).

внимание, естественно, уделено вертикальным компонентам Z движений пунктов GPS, так как мы изучали вертикальные скорости перемещений земной поверхности V под сейсмической станцией. Только на ближайшем к МАЮ пункте GPS (g105) выявлено некоторое сходство повышенных амплитуд вертикальных движений земной поверхности (рис. 10, график 2) с возникновением больших импульсов (график 1). На графике 2 выделяются два выброса: 1 февраля (32 день) с амплитудой среднеквадратичных отклонений 2.2σ и 26 февраля (56-й день), 2.65σ (треугольники). Оба они характеризовались повышенными значениями амплитуды импульсов. В целом, не совпадение повышенных значений вертикальных

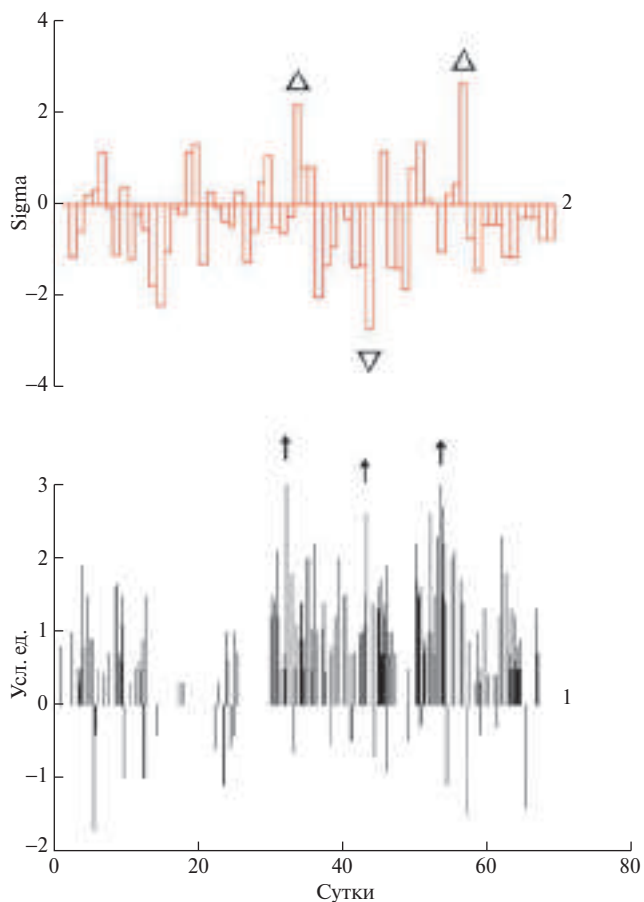


Рис. 10. Сопоставление времен появления сейсмических импульсов на станции МАЮ (1) в интервале 1 января – 10 марта 2011 г. с изменениями вертикального перемещения поверхности Земли (2) на пункте GPS g105 (см. рис. 1).

движений по данным GPS и сейсмической станции, возможно, объясняется следующими причинами.

1) Нам не известны координаты импульсов; они могут отличаться от местоположения пунктов GPS.

2) Длительность импульсов в среднем составляла 300 с (5 мин). Данные GPS представлены ежесуточными значениями (1440 мин).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы записи скорости вертикального перемещения земной поверхности возле широкополосных сейсмических станций, расположенных вокруг эпицентра землетрясения Тохoku 11.03.2011 г. с магнитудой 9.0. На протяжении 15 лет с 1991 по 2006 гг. ближайшая к эпицентру и удаленная от него на 386 км станция МАЮ

записывала устойчивый суточный ход сейсмического шума. С 2007 г. в записях обнаружены сопоставимые по амплитуде с суточными вариациями земных приливов импульсы. Их длительность в среднем составляла 300 с с постепенным нарастанием и последующим спадом амплитуды колебаний длительностью в несколько минут. Они возникали при спокойных метеорологических условиях и геомагнитной активности. Предполагается, что перед землетрясением происходили подвижки в геологических разломах литосферы Японии и прилегающей к ней Тихоокеанской плиты. Возможно также, что импульсы отражают нелинейные сейсмотектонические явления, описанные в работе [Кузьмин, Жуков, 2004]. Тот факт, что импульсы обнаружены перед двумя сильнейшими землетрясениями XXI века: 26.12.2004 и 11.03.2011 гг. с магнитудами ≥ 9 , соответствует, по нашему мнению, реальной динамике сейсмотектонического процесса. При квазипостоянных условиях тектонических напряжений в неоднородном по прочности веществе Земли большой разрыв горных пород будет предвещаться возникновением мелких разрывов, как это следует из теории лавинно-неустойчивого трещинообразования ЛНТ [Мячкин и др., 1975]. Изучение этого процесса может привести к среднесрочному прогнозу опасных землетрясений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Изд-во МГГУ, 2004. 264 с.
- Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
- Любушин А.А. Прогноз Великого Японского землетрясения // Природа. 2012. № 8. С. 23–33. <http://priroda.ras.ru/pdf/2012-08.pdf>
- Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975. С. 6–29.
- Смирнов В.Б., Шринагеш Д., Пономарев А.В. и др. Режим сезонных вариаций наведенной сейсмичности в области водохранилищ Койна–Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2017. № 4. С. 40–49.
- Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А. Синхронизация микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли. 2005. № 8. С. 3–27.
- Соболев Г.А. Низкочастотный сейсмический шум перед землетрясением Тохoku 11 марта 2011 г. с магнитудой 9 // Физика Земли. 2011. № 12. С. 11–22.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Соболев Д.Г. К вопросу о влиянии циклонов на сейсмичность // Вулканонология и сейсмология. 2012. № 2. С. 1–12.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Мигунов И.Н. и др. Влияние магнитных бурь на низкочастотный сейсмический шум // Физика Земли. 2020. № 3. С. 3–28.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Мигунов И.Н. Влияние атмосферных осадков на движения поверхности твердой Земли // Вулканонология и сейсмология. 2022. № 4. С. 1–13.
- 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, New York, New Rochell, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 1989. (Русский перевод: Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М.: Мир, 1993. 349 с.)
- Ishida K., Kobayashi N., Fukao Y. Origin of Earth's ground noise from 2 to 20 mHz // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 10. P. 521–524.
- Tanimoto T., Um J., Nishida K., Kobayashi N. Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 1553–1556.
- Wenzel G. Program PETGTAB. Version 3.01. Hannover: University, 1999.
- Wieland E., Streckeisen G. The leaf-spring seismometer – design and performance // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1982. V. 72. P. 2349–2367.

Seismotectonic Movements in the Minute Range of Periods Before the Catastrophic Earthquake in Japan March 11, 2011

G. A. Sobolev¹, I. N. Migunov^{1,*}

*¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Bol'shaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

**e-mail: inmig@mail.ru*

The vertical movements measured by a broadband seismic stations located around Tohoku earthquake 11.03. 2011 with magnitude 9 are calculated. It is shown that during the 15 years before the earthquake the closest to epicenter MAJO station located 386 km from the epicenter the quiet daily variations was demonstrated. Seismic pulses with the durations of a few minutes and amplitudes bigger 10% of the diurnal variations of tidal velocities were revealed in 2009 year. They appeared under quiet meteorological and geomagnetic conditions. These pulses are not found on the records of the stations remoted more 700 km from epicenter. It is hypothesized that sharp changes in the low frequency seismic noise reflect the tectonic deformations in the lithosphere of Japan and adjoin part of Pacific Ocean.

Keywords: earthquakes, seismic stations, tectonic deformations, meteorological conditions