

УДК 550.334

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСЫ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ В ЧИЛИ 2010 г. $M=8.8$

© 2024 г. **Г. А. Соболев**¹, *, **И. Н. Мигунов**¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: sobolev@ifz.ru

Поступила в редакцию 27.11.2023 г.

После доработки 09.01.2024 г.

Принята к публикации 16.01.2024 г.

Исследованы записи скорости вертикального перемещения земной поверхности возле широкополосных сейсмических станций, расположенных на западном берегу Южной Америки и в прилегающем районе Тихого океана, где 27.02.2010 г. произошло землетрясение с магнитудой M_w 8.8. Начиная с 2009 г. в записях некоторых станций обнаружены асимметричные сейсмические импульсы длительностью в сотни секунд. Они возникали при спокойных метеорологических условиях и геомагнитной активности. Предполагается, что перед землетрясением происходили тектонические подвижки в литосфере океана и континента.

Ключевые слова: землетрясения, широкополосные сейсмические станции, тектонические деформации.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724030018>, **EDN:** APRXNH

ВВЕДЕНИЕ

В работах [Соболев, Мигунов, 2023; 2024] было продемонстрировано, что за несколько месяцев до землетрясения в эпицентральных зонах двух гигантских землетрясений с магнитудами $M \approx 9$ возле Суматры в 2004 г. и Японии 2011 г. возникали сейсмические импульсы, природа которых предположительно связывалась с движениями по геологическим разломам. В промежутке времени между этими сейсмическими событиями в Тихом океане у берегов Чили 27.02.2010 г. возникло землетрясение примерно такой же силы с $M \approx 9$ (более точно — с магнитудой M_w 8.8 [Duputel et al., 2012]), длина разрыва которого составляла более 500 км¹. Эпицентр находился в координатах [36.122° ю.ш.—72.898° з.д.] при глубине очага 22 км.

Это землетрясение не имело столь катастрофических социальных последствий, как события возле Суматры и Японии, в связи с чем, по-видимому, его описанию не уделялось большого внимания в научной литературе. У нас была возможность изучить сейсмические записи нескольких широкополосных станций системы IRIS, расположенных на континенте Южной Америки и в прибрежной области Тихого

океана. Эти станции, а также эпицентр землетрясения в Чили показаны на рис. 1. Станция LCO [29.01° ю.ш.—70.70° з.д.] расположена в горной системе Анд на высоте $H = 2299$ м, на расстоянии $R = 800$ км от эпицентра Чилийского землетрясения; станция LVC [22.61° ю.ш.—68.91° з.д.] — в той же горной системе $R = 1700$ км и $H = 2930$ м; станция NNA — [11.99° ю.ш.—76.84° з.д.] на побережье Тихого океана, $R = 2900$ км, $H = 575$ м; станция RPN [27.13° ю.ш.—109.33° з.д.] — на острове Rapaui, Easter, $R = 3700$ км, $H = 9$ м. Все эти станции оборудованы 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.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

С учетом результатов ранее выполненных исследований в работах [Соболев, Мигунов, 2023; 2004] осуществлялся поиск асимметричных сейсмических импульсов, имеющих длительность порядка 200–300 с. Такие сигналы отличались даже визуально от сейсмических колебаний, вызванных как местными, так и удаленными землетрясениями. Это демонстрируется на рис. 2. В правой части

¹ https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official/20100227063411530_30/finite-fault

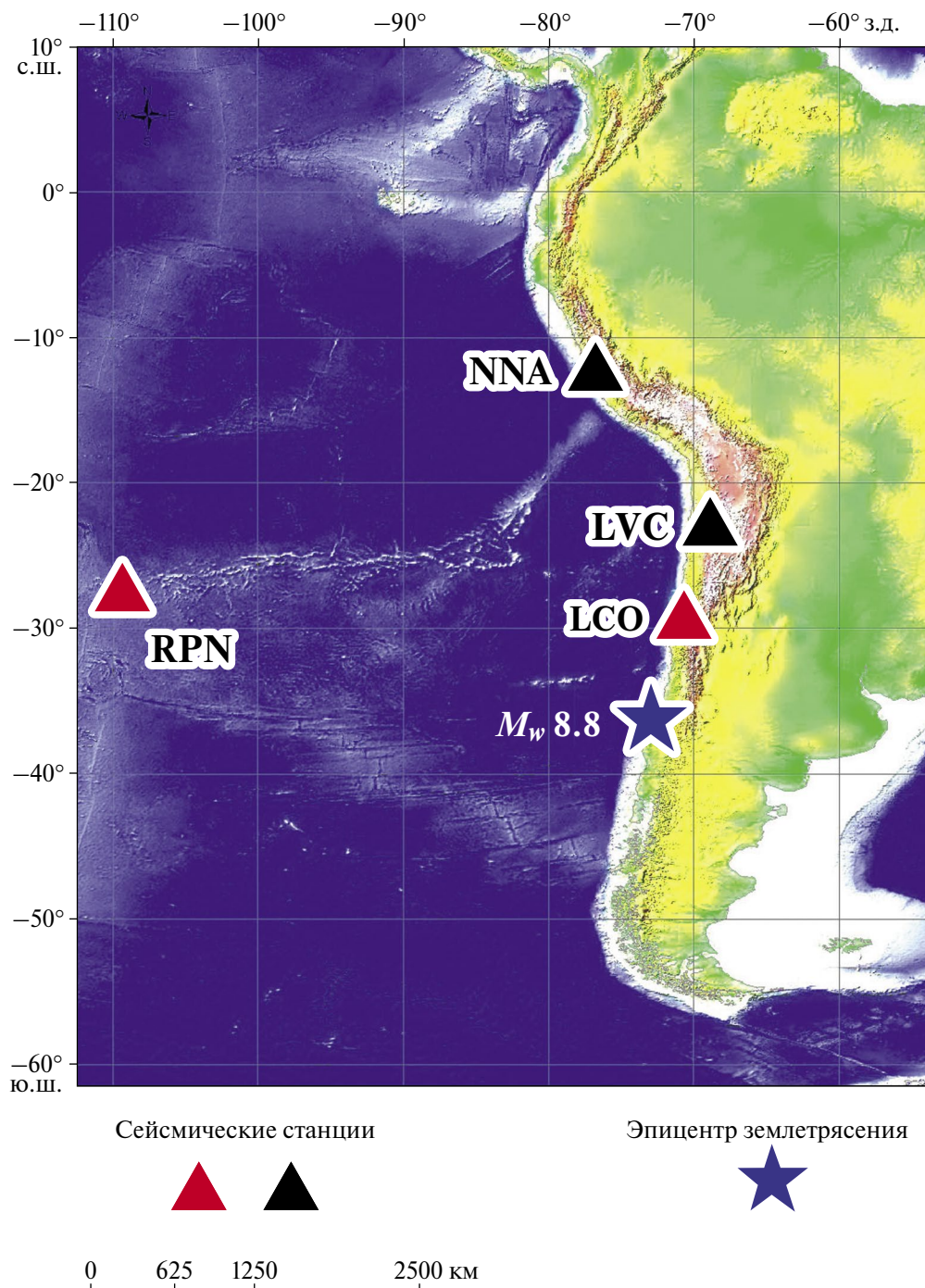


Рис. 1. Широкополосные сейсмические станции, данные которых использованы в настоящей работе. Красным цветом показаны станции, на записях которых были выявлены анализируемые в работе сейсмические импульсы.

рисунка показана запись на станции LCO землетрясения, возникшего под Тихим океаном на расстоянии примерно 2000 км к юго-западу от станции. Периоды колебаний местных сейсмических событий в данном частотном диапазоне составляют 25–35 с. Слева на рис. 2 показан один из импульсов, исследуемых в настоящей работе. Он появился за 6 часов до Чилийского землетрясения; имеет

однополярную форму и длительность 270 с. Мы ограничились анализом записей в разные годы только за интервалы январь–февраль. В эти месяцы на западе Южной Америки не проявляются субтропические циклоны², влияющие на сейсмический шум [Соболев и др., 2012].

² <http://weather.unisys.com/hurricane>

На ближайшей к эпицентру станции LCO один импульс появился в 2008 г., а в 2009 г. их было много. Примеры импульсов, не искаженных землетрясениями или помехами неизвестного происхождения, приведены на рис. 3. Слева от импульсов указаны величины атмосферного давления и скорости ветра в день возникновения соответствующего импульса. Для этого использованы данные метеообсерватории La Seren, расположенной в 50 км от сеймостанции LCO. Данные о приведенных на рисунке индексах геомагнитной активности получены из архива <http://www.spaceweatherlive.com>. В таблицах архива указаны величины планетарных Kp -индексов — отклонений магнитного поля Земли от нормы в течение трехчасовых интервалов соответствующих суток (GFZ Potsdam official Kp -index). Значения Kp -индексов при самых сильных бурях достигают величины 9.

Сейсмические импульсы, обнаруженные в записях станции RPN, представлены на рис. 4. Атмосферное давление и скорость ветра взяты по данным метеостанции Isla de Pascua, находящейся всего в 10 км от RPN.

При сопоставлении импульсов на станциях LCO и RPN было выяснено, что они появлялись с разницей в несколько часов или дней, в то время как местные или удаленные землетрясения регистрировались станциями с разницей менее 1000 с (на рисунках не показано). Можно, таким образом, предположить, что обсуждаемые импульсы возникали вблизи станции и область их распространения была меньше расстояния между станциями (менее 3000 км). Просмотр записей за январь—февраль 2006—2010 гг., представленных на рис. 1 станций, показал, что такие сигналы не возникали на станциях LVC и NNA.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее мы отмечали, что сейсмические импульсы в минутном диапазоне периодов могут возникать при резких возмущениях атмосферного давления [Соболев и др., 2012], выпадении осадков [Соболев и др., 2022] и геомагнитных бурях [Соболев и др., 2020]. Применительно к настоящей работе было проверено, не совпадают ли времена импульсов с такими

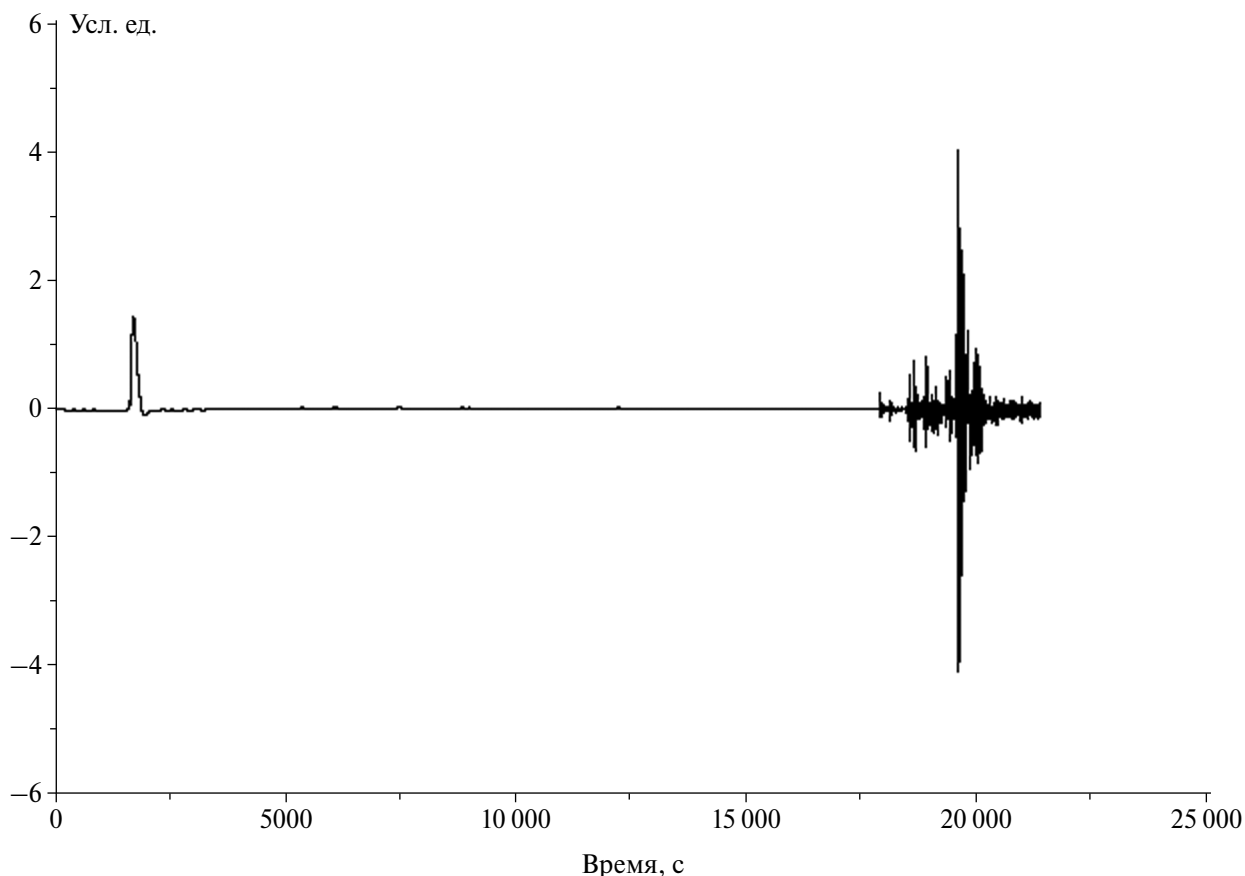


Рис. 2. Пример записи землетрясения (справа) и асимметричного импульса (слева), возникших вблизи очага землетрясения Чили, на станции LCO.

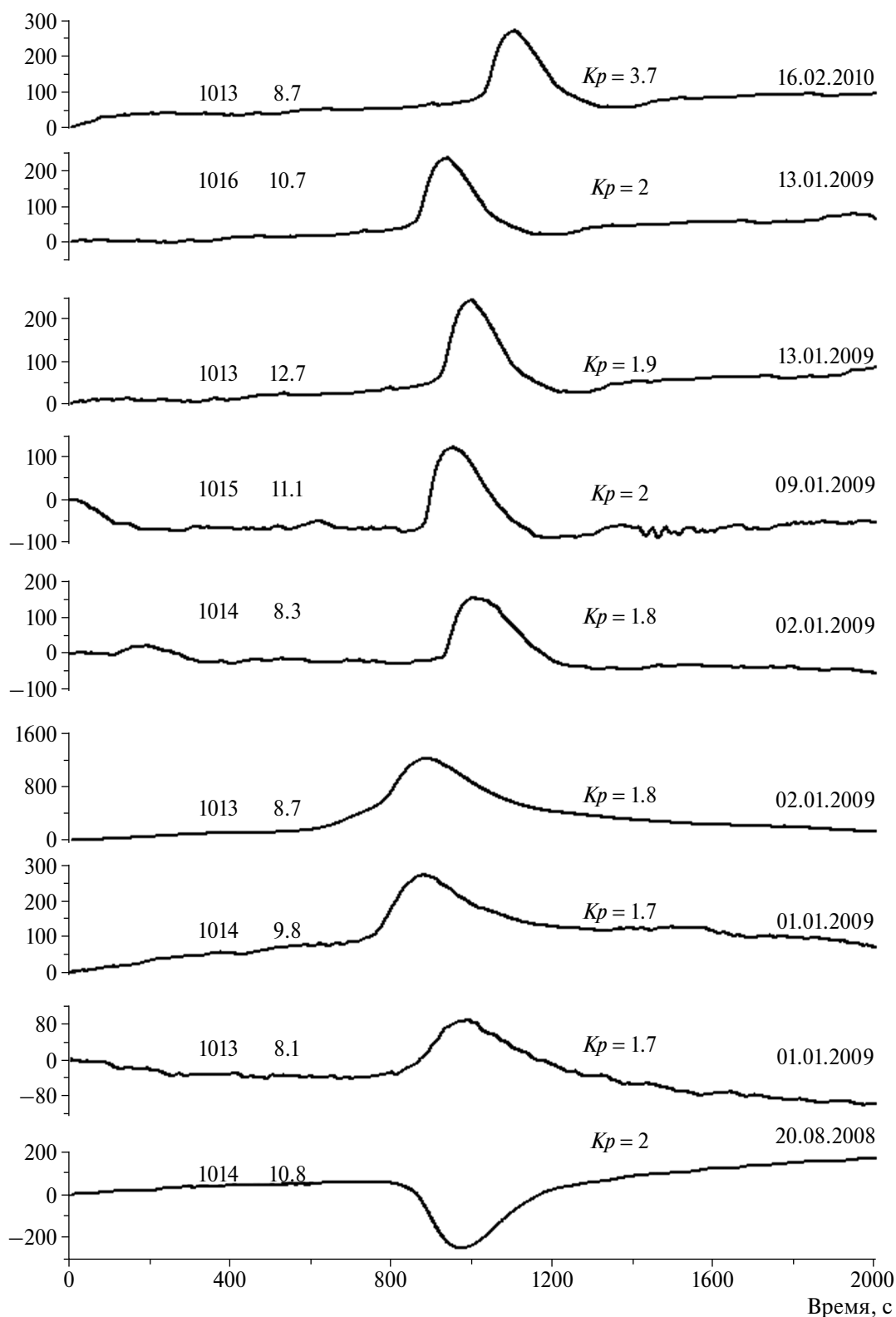


Рис. 3. Примеры сейсмических импульсов, записанных станцией LCO в некоторые дни перед землетрясением Чили. Даты записей показаны около кривых справа. По оси абсцисс — время в секундах от начала соответствующего фрейма, фрейм выбирался так, чтобы импульс находился в его середине. По оси ординат — величина сейсмической записи в условных единицах. Слева от импульсов указаны значения атмосферного давления (в гПа) и скорости ветра (в м/с), справа — уровень геомагнитной активности Kp .

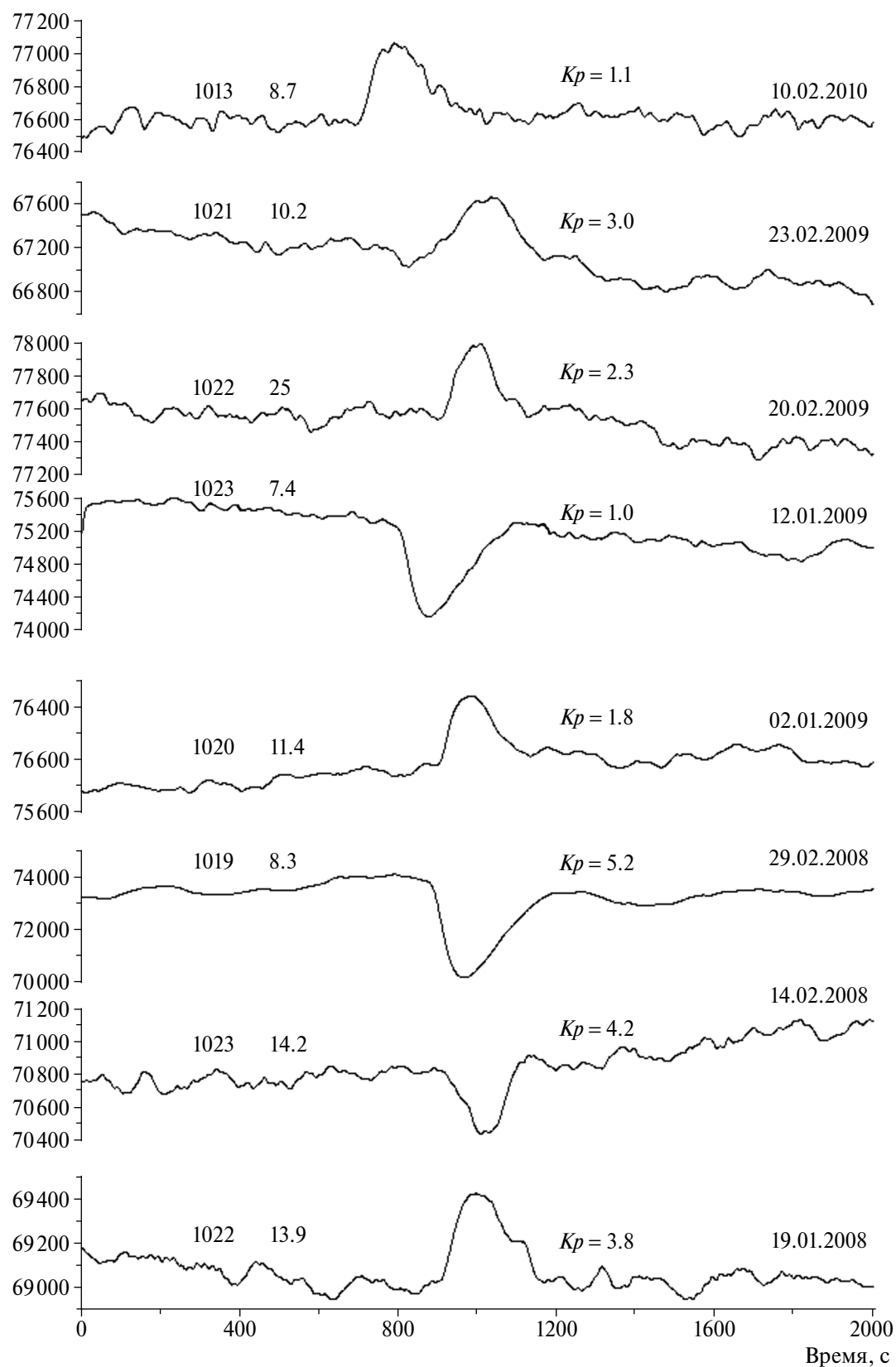


Рис. 4. Примеры сейсмических импульсов, записанных станцией RPN в некоторые дни перед землетрясением Чили. Обозначения – см. рис. 3.

экстремальными явлениями. Осадков во время показанных на рис. 3 и рис. 4 импульсов не выпадало. Величины атмосферного давления и скорости ветра были сопоставлены со средними значениями этих климатических параметров в периоды изучения импульсов: январь—февраль 2008, 2009, 2010 годов по данным вышеназванных близлежащих к станциям LCO и RPN метеорологических обсерваторий. Выяснено, что как для LCO, так и для RPN величины атмосферного давления и скорости ветра не выходили во всех случаях из диапазона трех стандартных отклонений. Следовательно, можно заключить, что импульсы появились при нормальных метеоусловиях. Не было также геомагнитных бурь с величинами $Kp > 5.5$. По доступным нам данным мы не можем что-то сказать о влиянии подземных флюидов, проявляющихся в литосфере в разной форме [Родкин, Рундквист, 2017].

Примечательным фактором на рис. 3 и рис. 4 является похожесть импульсов по форме на обеих сейсмических станциях. В работах [Соболев, Мигунов, 2023; 2024] обсуждалась гипотеза, что перед двумя гигантскими землетрясениями возле Суматры и в Японии с $M \approx 9$ в разломах земной коры и литосферы возникали медленные по сравнению со скоростью упругих волн подвижки. Обсуждаемые в настоящей работе результаты выявления импульсов перед Чилийским землетрясением не противоречат такому предположению. Приуроченность землетрясений к тектоническим разломам надежно установлена [Морозов и др., 2020]. В связи с этим не является, по нашему мнению, экзотическим предположение, что обсуждаемые импульсы отражают движения по разрывным нарушениям в земной коре и литосфере. Выявленное пространственное расположение импульсов в районе очага Чилийского землетрясения, естественно, указывает на тектоническую природу. Появление импульса вблизи сейсмической станции может быть связано с развитием подвижки по геологическому разлому. Относительно медленная подвижка не создает регистрируемые станцией сейсмические волны. Время нарастания первого колебания от землетрясения (справа на рис. 2) составляет 20 с. А время нарастания импульса (слева на рис. 2) равно 230 с. Если предположить, что скорость такого движения по разлому на порядок меньше скорости упругих колебаний (≈ 2 км/с), то длительность нарастания импульса около 10^2 с будет указывать на длину вовлеченного в движение разлома [Куксенко и др., 1983]; в нашем случае — это составляет порядка нескольких километров.

Высокая степень похожести форм импульсов, в том числе под континентом и океаном, вызывает вопросы. Не понятно, почему это наблюдается, несмотря на разномасштабную блоковую неоднородность литосферы [Садовский, Писаренко, 1991].

Рассмотрим более общую закономерность. Хорошо известно, что акустические сигналы возникают при закипании воды, т.е. при переходе жидкой фазы в газообразную. В работах [Садовский, Писаренко, 1991] показано, что горная порода состоит из разных по размеру и прочности блоков. Возникновение большого землетрясения означает переход квазисплошной среды к разрушенной. Такие явления известны в физике хаотических динамических систем [Ott, 2002]. При этом массовое появление импульсов может рассматриваться как предвестник и способствовать созданию метода среднесрочного прогноза землетрясений. Известны разнообразные способы прогнозов [Завьялов, 2006]. Большинство их основано на совпадении временных и пространственных аномалий разных геофизических явлений с местоположением землетрясения. Общим недостатком является отсутствие генетической связи с очагом. Рассматриваемое в настоящей работе явление может быть классифицировано как фундаментальный (*fundamental* — основной, коренной) предвестник, поскольку он основан на известной физической закономерности развития катастрофы в неоднородной среде.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. М.: Наука. 2006. 254 с.
- Куксенко В.С., Станчиц С.А., Томилин Н.Г. Оценка размеров растущих трещин и областей разгрузки по параметрам акустических сигналов // Механика композитных материалов. 1983. № 3. С. 536.
- Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Маневич А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны сильного землетрясения в Турции (Измит, 1999 г., $M 7.4$) // Вулканология и сейсмология. 2020. № 2. С. 43–54.
- Родкин М. В., Рундквист Д.В. Геофлюидогеодинамика. Долгопрудный: Издательский Дом “Интеллект”. 2017. 288 с.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука. 1991. 96 с.

Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Соболев Д.Г. К вопросу о влиянии циклонов на сейсмичность // Вулканология 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 // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 1–13.

Соболев Г.А., Мигунов И.Н. Сейсмотектонические подвижки в минутном диапазоне периодов перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2024 (в печати).

Соболев Г.А., Мигунов И.Н. Сейсмотектонические изменения перед землетрясением Суматра 26.12.2004, $M = 9.1$ // Физика Земли. 2023. № 4. С. 29–38.

Dupute Z., Rivera L., Kanamori H., Hayes G. W phase source inversion for moderate to large earthquakes (1990–2010) // Geophysical Journal International. 2012. V. 189(2). P. 1125–1147.

Ott E. Chaos in dynamic systems. Cambridge Univ. Press. 2002. 478 p.

Wieland E., Streckeisen G. The leaf-spring seismometer – design and performance // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1982. V. 72. P. 2349–2367.

Seismic Pulses before the February 27, 2010, $M = 8.8$ Chile Earthquake

G. A. Sobolev^{a, *} and I. N. Migunov^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^{*}*e-mail: sobolev@ifz.ru*

Received November 27, 2023

revised January 9, 2024

accepted January 16, 2024

Abstract – The study analyzes the records of vertical velocity of the Earth's surface motions near broadband seismic stations located on the west coast of South America and in the adjacent region of the Pacific Ocean where the M_w 8.8 earthquake occurred on February 27, 2010. Starting from 2009, asymmetric seismic pulses lasting several hundred seconds have been detected in the records of some stations. These pulses appeared under quiet weather conditions and geomagnetic activity. It is believed that the earthquake was preceded by tectonic movements in the oceanic and continental lithosphere.

Keywords: earthquakes, wideband seismic stations, tectonic deformations