

УДК 550.334

## СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ СУМАТРА 26.12. 2004 г., $M = 9.1$

© 2023 г. Г. А. Соболев<sup>1</sup>, \*, И. Н. Мигунов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: sobolev@ifz.ru

Поступила в редакцию 04.11.2022 г.

После доработки 10.12.2022 г.

Принята к публикации 16.12.2022 г.

Исследованы записи скорости вертикального перемещения земной поверхности возле широкополосных сейсмических станций, расположенных вокруг эпицентра землетрясения Суматра 26.12. 2004 г. с магнитудой 9.1. 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. на ней появились ступенеобразные искажения уровня записи. Они продолжались вплоть до момента землетрясения. Обнаружены также превышающие 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. Предполагается, что перед землетрясением происходили подвижки в геологических разломах литосферы Индийского океана.

*Ключевые слова:* землетрясения, широкополосные сейсмические станции, тектонические деформации, метеорологические условия.

**DOI:** 10.31857/S0002333723040105, **EDN:** TMFDNU

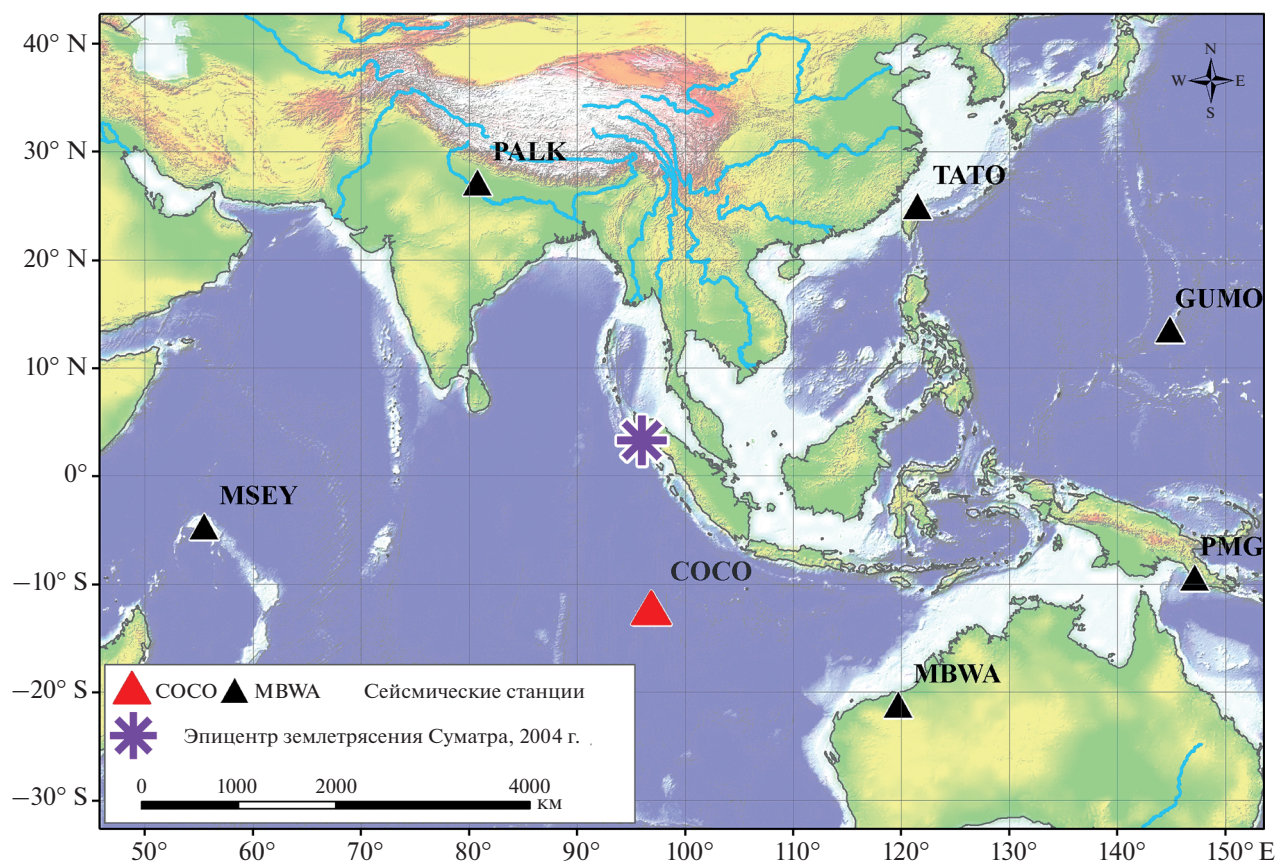
### ВВЕДЕНИЕ

После создания в 90-х годах глобальной системы широкополосных сейсмических станций системы IRIS возник ряд исследований сейсмических шумов в диапазоне  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  с. 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  $>7.5$ . Была отмечена синхронизация шума на станциях, близко расположенных к очагам сильных землетрясений. Предполагалось, что природа шума связана с криповыми подвижками возле постаментов стан-

ций. Некоторые наши исследования низкочастотного сейсмического шума касались землетрясения Суматра 2004 г. В работе [Sobolev, 2019] установлено, что после него сейсмический шум изменился в разных районах Земли. Анализ скрытых периодичностей в работе [Соболев, Любушин, 2007] показал, что перед землетрясением Суматра после произошедшего за 57 ч до него сейсмического толчка возле Новой Зеландии McQuagu с  $M = 8.1$  возникли когерентные колебания в диапазоне 20–60 мин на ряде сейсмических станций. Целью настоящей работы являлось исследование за многие годы низкочастотного шума перед землетрясением Суматра на расположенных вокруг эпицентра однотипных станциях.

### МЕТОДИКА

Мы изучали ежесекундные записи широкополосных сейсмических станций IRIS, оснащенных сейсмометрами, позволяющими исследовать при одной и той же чувствительности колебания в диапазоне 0.2–360 с [Wieland, Streckeisen, 1982]. Из базы GSNet\_152.dat взяты данные станций,



**Рис. 1.** Расположение широкополосных сейсмических станций в районе землетрясения Суматра, 2004 г., записи которых использованы в настоящей работе.

расположенных вокруг эпицентра землетрясения Суматра 26.12.2004 г. (рис. 1). Канал LHZ каждой станции регистрирует вертикальную скорость смещения грунта  $V$ . Были использованы записи станций, не содержащих техногенных помех. Записи ближайшей к эпицентру станции COCO проанализированы за 9 лет до землетрясения и 5 лет после него. Станция расположена на одном из Кокосовых островов в 1700 км к югу от эпицентра землетрясения и в 1200 км к западу от Южной части острова Суматра. Сейсмометр установлен на плоской покрытой травой площадке на высоте 1 м над уровнем моря. Записи исследовались в декабре каждого года. Выбор декабря обусловлен тем, что в этом месяце не бывает тропических тайфунов (West Pacific) на западе Тихого океана, влияющих на сейсмический шум. Принималось во внимание, что землетрясение Суматра произошло также в декабре.

Просмотр всего ряда наблюдений показал, что на протяжении 5 лет с 1996 по 2000 г. станция

COCO записывала устойчивый суточный ход сейсмического шума. Пример записей в течение 3-х последовательных суток 25–27 декабря 2000 г. показан на рис. 2. В спектре шума выделяются максимумы с периодами 4–7 с, обусловленные микросейсмами волнения океана. Амплитуда этого шума примерно в 2 раза превышает амплитуду полусуточных колебаний земного прилива. Теоретические ежеминутные значения скорости прилива в том же интервале 25–27 декабря 2000 г., вычисленные по программе PETGTAB [Wenzel, 1999] для координат сейсмической станции COCO [12.190 ю.ш.–96.835 в.д.], представлены черными линиями на рис. 3. Они сопоставлены с реальными записями этой станции (красные линии). Последние приведены к ежеминутным значениям усреднением исходных секундных данных из GSNet\_152.dat в 60 раз. Рисунок 3 демонстрирует высокую степень сходства реальных и теоретических значений с коэффициентом корреляции  $\geq 0.99$ . Из рис. 2 и рис. 3 следует, что су-

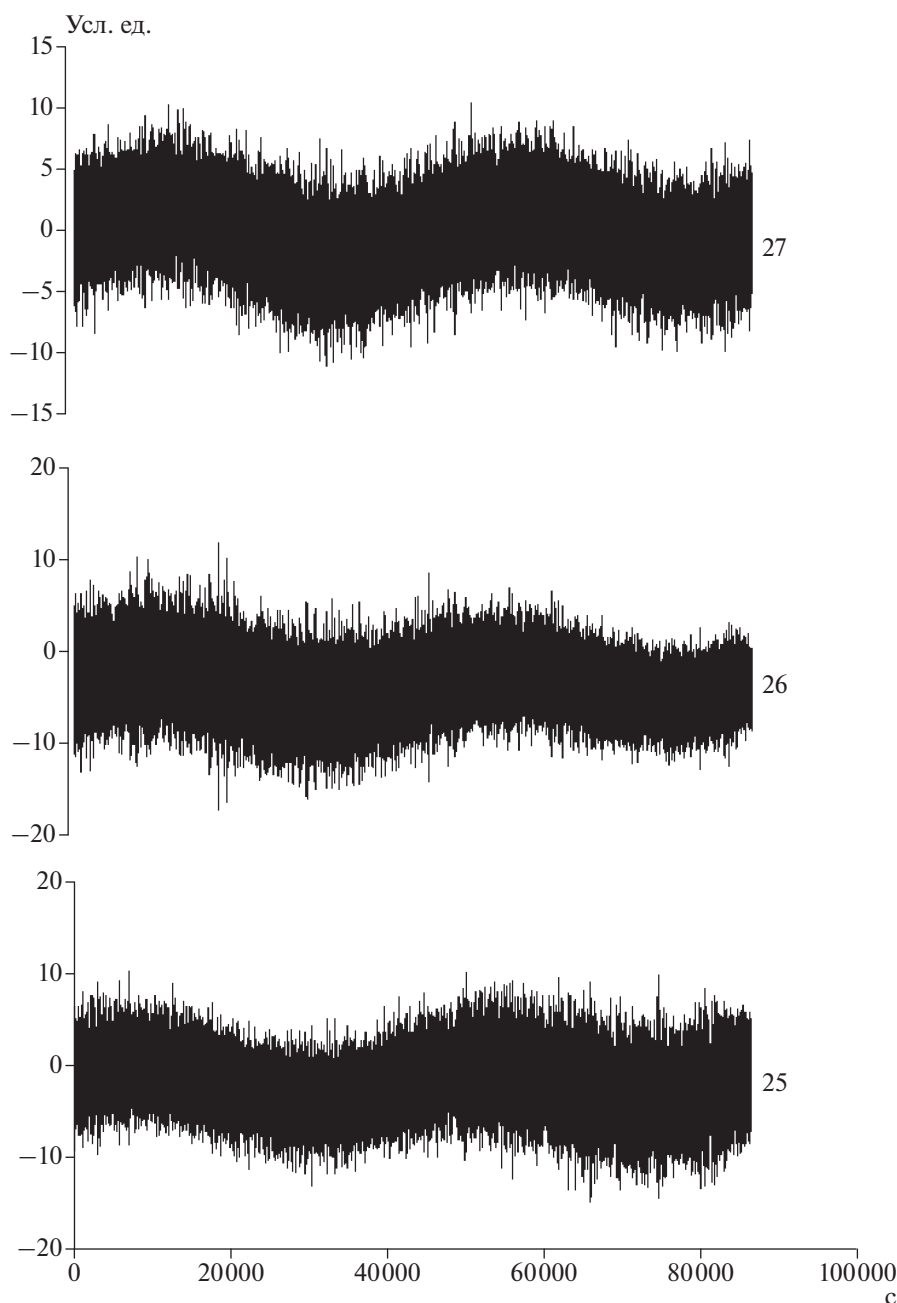


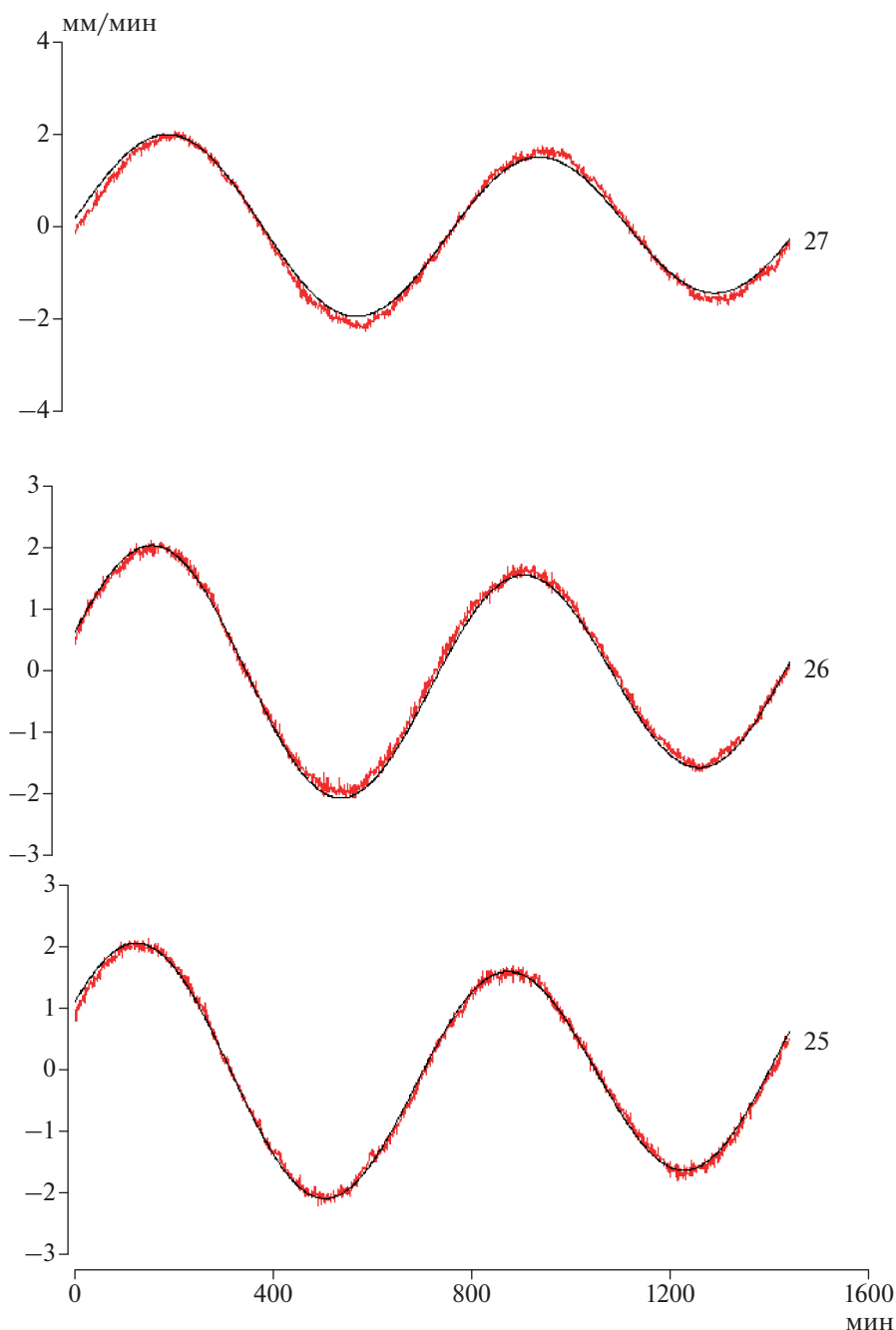
Рис. 2. Фоновые суточные вариации сейсмического шума на станции СОСО 25, 26, 27 декабря 2000 г.

существует возможность поиска изменений в сейсмическом шуме данной станции в связи с землетрясением Суматра.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

В 2001 г. на станции СОСО появились ступенчатые искажения уровня записи. Они продолжались вплоть до момента землетрясения

26.12.2004 г. Обнаружено также несколько выбросов (аномалий). Они обозначены треугольниками на рис. 4. Если величина аномалии 29.12.2003 г. соизмерима с величиной шума (график 29), то в датах 31.12.2003 г. (31) и 06.12.2004 г. (06) величина выбросов превышает шум в несколько раз. Динамика отмеченных аномальных изменений в более детальном временном масштабе показана на рис.

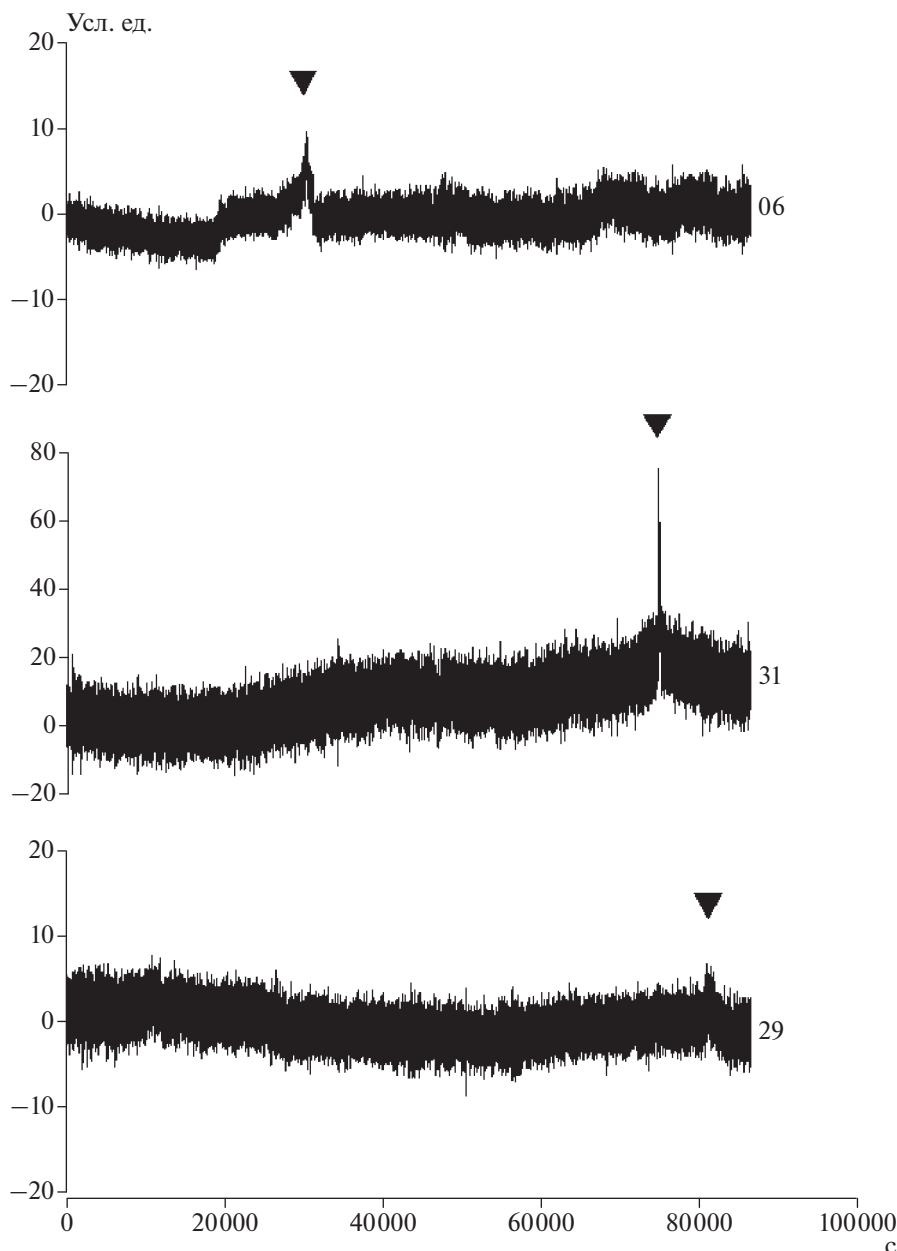


**Рис. 3.** Вариации ежеминутных значений скорости вертикального перемещения поверхности земли теоретически вычисленного прилива (черные линии) и реальных значений по данным станции СОСО (красные линии) за 25, 26, 27 декабря 2000 г.

5. Они имеют форму импульса длительностью в нескольких минут.

В записях разных станций, расположенных вокруг эпицентра землетрясения Суматра (рис. 1), аномалий во время выбросов на станции СОСО не отмечено. Это иллюстрируется рис. 6, где по-

казаны записи 7-ми станций за период 31.12.2003 г. Только на станции СОСО выделяется выброс (отмечен треугольником), в десятки раз превосходящий уровень шума. По расстояниям от СОСО до других станций можно определить, что размер аномальной области не превышал 4000 км.

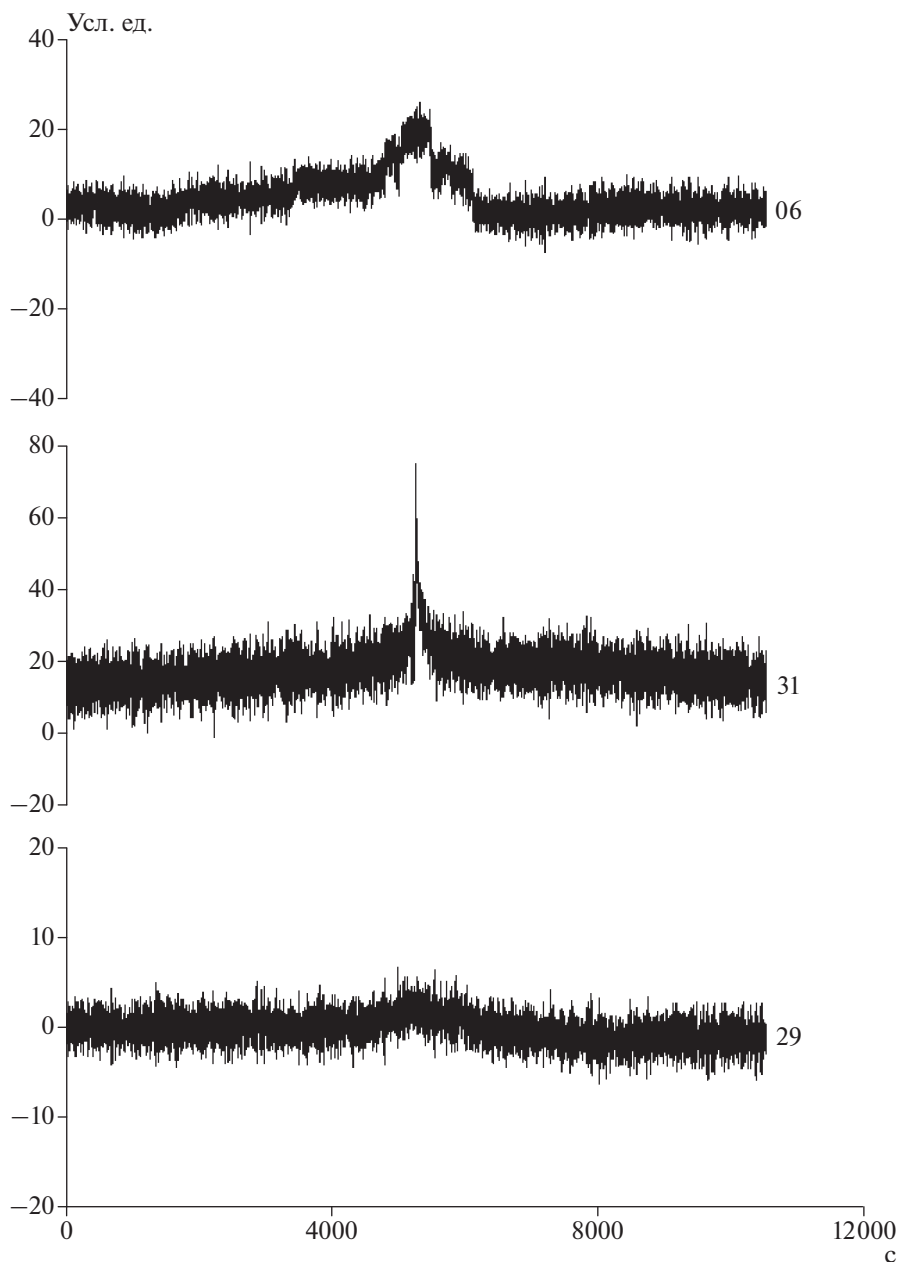


**Рис. 4.** Аномальные выбросы сейсмического шума на станции COCO перед землетрясением Суматра 29, 31 декабря 2003 г. и 06 декабря 2004 г.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из ранее проведенных работ следовало, что аномалии скорости вертикальных движений в минутном диапазоне периодов могут быть вызваны резкими изменениями атмосферного давления и выпадением дождя или магнитными бурями [Соболев, 2021; Соболев и др., 2022]. Мы рассмотрели такие явления во время 3-х аномалий, представленных на рис. 4. Метеорологические данные взяты из наблюдений метеорологической обсерватории COCOS ISLAND AERO [12.11 ю.ш.—

96.50 в.д.], расположенной в 38 км от сейсмической станции COCO. На рис. 7 представлены ежесуточные вариации атмосферного давления (1), скорости ветра (2) и выпадения осадков (3) за декабрь 2003 г. и декабрь 2004 г. (4, 5, 6). Описанные выше аномалии отмечены треугольниками. Стрелка обозначает время землетрясения Суматра 26.12.2004 г. Во всех случаях значения метеорологических параметров во время аномалий не выходят за пределы обычного фона.

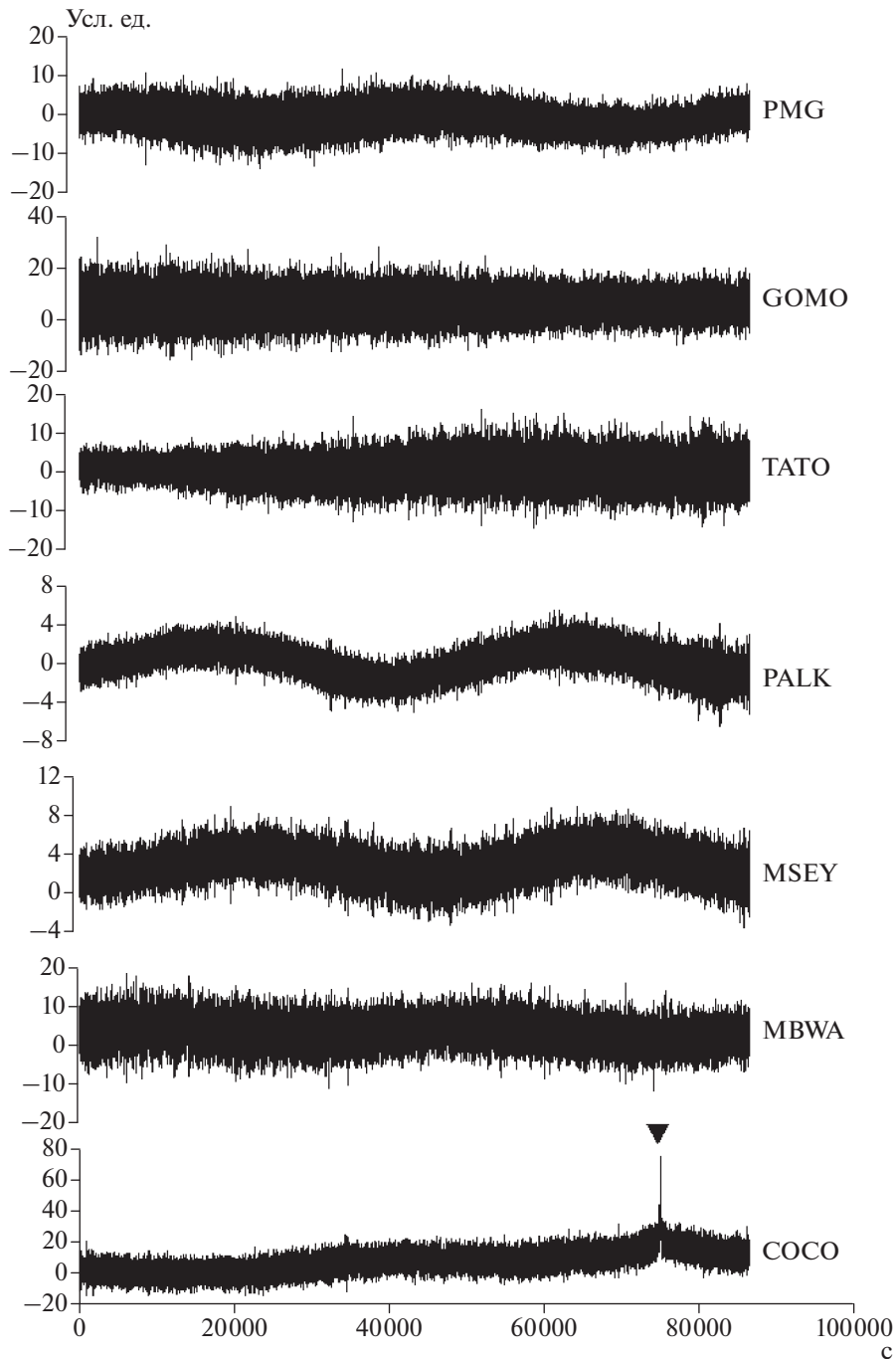


**Рис. 5.** Аномальные выбросы сейсмического шума на станции СОСО перед землетрясением Суматра в течение 3-х часов 29, 31 декабря 2003 г. и 06 декабря 2004 г.

Сведения о сильных магнитных бурях получены из архива <http://www.spaceweatherlive.com>. В таблицах архива указаны величины планетарных Кр-индексов — отклонений магнитного поля Земли от нормы в течение трехчасовых интервалов соответствующих суток (GFZ Potsdam official Кр-index). Значения Кр-индексов при самых сильных бурях достигают величины 9. На рис. 8 показаны максимальные значения Кр в каждые сутки при вышеотмеченных аномалиях в декабре

2003 и 2004 гг. Превышения уровня геомагнитной активности от фоновых значений во время аномалий не было.

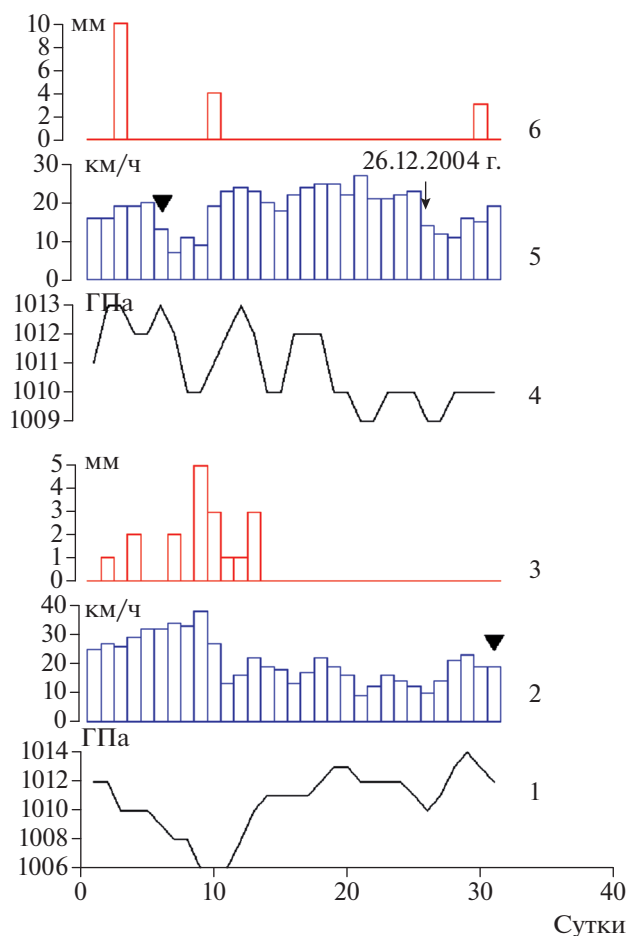
Эти факты, а также отсутствие аномалий на станции СОСО в течение 5 лет до 2001 г., по-видимому, свидетельствуют о том, что вышеприведенные выбросы скорости перемещения грунта вызваны сеймотектоническими процессами. Аномалия 06.12.2004 г. была последней перед землетрясением. Затем вариации шума в минут-



**Рис. 6.** Сопоставление аномального выброса сейсмического шума на станции COCO 31.12.2003 г. (отмечен треугольником) с синхронными по времени вариациями шума на других станциях.

ном диапазоне периодов до и в течение 5 лет после землетрясения демонстрировали на этой станции спокойный суточный ход как на рис. 2. Однако это не означает, что аномальные процессы перед землетрясением Суматра прекратились. Так, за сутки до этого сейсмического события

возникли ступенчатые изменения уровня записи на станции GUMO, а станция PMG после ряда сбоев прекратила регистрацию 16 декабря. Возможно, процесс тектонической активизации сместился к востоку от землетрясения. Но произошедшие вблизи показанных на рис. 1 станций



**Рис. 7.** Вариации атмосферного давления, скорости ветра и толщины слоя выпадения осадков в декабре 2003 г. (1, 2, 3) и в декабре 2004 г. (4, 5, 6). Треугольниками отмечены аномальные выбросы сейсмического шума на станции СО-СО. Стрелка указывает время землетрясения Суматра.

местные сейсмические события не позволили провести аккуратное изучение процесса в последние несколько суток до землетрясения Суматра.

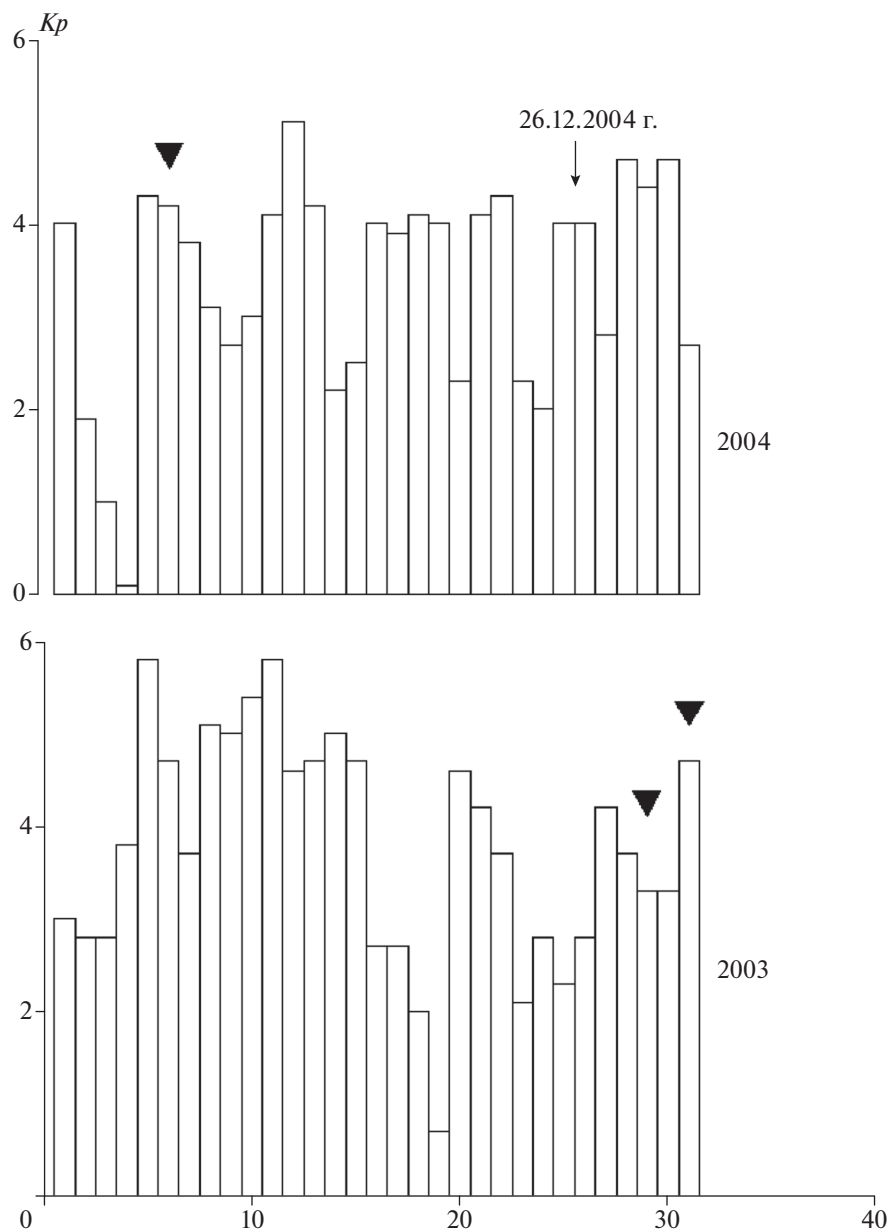
Обратим внимание на то обстоятельство, что динамика аномальных возмущений, показанных на рис. 5, напоминает образ явления *stick-slip*, демонстрирующего ступенчатое развитие деформаций на контакте блоков твердых тел, в том числе горных пород, в лабораторных экспериментах [Scholz, 1990; Соболев и др., 2016]. Можно предположить, что перед землетрясением происходили подвижки в геологических разломах литосферы Индийского океана. Связанные с перестройкой тектонических напряжений деформации в разломных зонах перед землетрясениями выявлялись неоднократно [Морозов и др., 2020]. Отсутствие на островах в районе землетрясения Сумат-

ра регулярных GPS-наблюдений не позволяет проверить такое предположение независимым методом. Не ясно также, были ли при подготовке землетрясения изменения структуры подземных флюидов, играющих существенную роль в динамике процессов в земной коре и литосфере [Родкин, Рундквист, 2017].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным широкополосных сейсмических станций выявлены искажения вертикальных движений земной поверхности перед мегаземлетрясением Суматра 2004 г. Это увеличивает оптимизм решения задач среднесрочного (месяцы) прогноза сильных, в том числе катастрофических землетрясений, с магнитудами свыше 8.





**Рис. 8.** Вариации параметра  $K_p$  геомагнитной активности в декабре 2003 г. и в декабре 2004 г. Треугольниками отмечены аномальные выбросы сейсмического шума на станции СОСО. Стрелка указывает время землетрясения Суматра.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Морозов В.Н., Татаринев 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.

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., Любушин А.А. Микросейсмические аномалии перед землетрясением 26 декабря 2004 г. на Суматре // Физика Земли. 2007. № 5. С. 3–16.

Соболев Г.А., Пономарев А.В., Майбук Ю.Я. Инициирование неустойчивых подвижек – микроземлетрясений упругими импульсами // Физика Земли. 2016. № 5. С. 51–69.

*Соболев Г.А.* Воздействие магнитной бури на тектонические деформации и береговой эффект // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 11–28.

*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.

*Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А.* Вариации геофизических полей при ураганах и шквалах // Докл. РАН. 2018. Т. 480. № 5. С. 592–595.

*Ekstrom G.* Time domain analysis of Earth's long-period background seismic radiation // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № B11. P. 26483–26493.

*Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y.* Origin of Earth's ground noise from 2 to 20 mHz // Geophys. Res. Letters. 2002. V. 29. № 10. P. 521–524.

*Scholz C.H.* The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge Univ. Press. 1990. P. 439.

*Sobolev G.A.* Low-Frequency Seismic Noise Before and After the Sumatra Megaequake of December 26, 2004 // Doklady Earth Sciences. 2019. V. 485. Part 2. P. 395–400.

*Tanimoto T., Um J., Nishida K., Kobayashi N.* Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days. Geophysical Research // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 1553–1556.

*Wenzel G.* Program PETGTAB. Version 3.01. 1999. University Hannover.

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

## Seismotectonic Changes Before the $M = 9.1$ Sumatra Earthquake of December 26, 2004

G. A. Sobolev<sup>a,\*</sup> and I. N. Migunov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

*\*e-mail: sobolev@ifz.ru*

Records of vertical surface displacement velocities in the vicinity of broadband seismic stations located around the epicenter of the 9.1 magnitude Sumatra earthquake on December 26, 2004 are analyzed. During five years from 1996 to 2000, the COCO station, nearest to the epicenter and located at a distance of 1700 km from it, has recorded a steady daily behavior of seismic noise. In 2001, step-like distortions of the level of the recorded seismic noise appeared at this station. These distortions continued up to the time of the earthquake. The station also detected pulses above the diurnal behavior, with a gradual increase and subsequent decrease in the amplitude of the oscillations which lasted a few minutes. The pulses occurred under quiet weather conditions and geomagnetic activity. No such pulses were observed at stations more than 2000 km from the epicenter. It is hypothesized that before the earthquake, there had been a slip on the geological faults in the lithosphere of the Indian Ocean.

*Keywords:* earthquakes, broadband seismic stations, tectonic deformations, weather conditions