

УДК 550.334

ВОЗДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОЙ БУРИ НА ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ И БЕРЕГОВОЙ ЭФФЕКТ

© 2021 г. Г. А. Соболев*

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

*e-mail: sobolev@ifz.ru

Поступила в редакцию 20.10.2020 г.

После доработки 03.12.2020 г.

Принята к публикации 11.12.2020 г.

Изучены записи 58 идентичных широкополосных сейсмических станций во время сильных геомагнитных бурь. Исследованы колебания с периодами в несколько часов. Они сопоставлены с синхронными вариациями земных приливов. На станциях, расположенных в приграничных областях континент–океан, проявлялись после бури аномальные изменения скорости деформаций. Они длились несколько суток с амплитудой до нескольких миллиметров в минуту.

Ключевые слова: сейсмические станции, тектонические деформации, магнитная буря, земной прилив, береговой эффект

DOI: 10.31857/S0203030621020061

ВВЕДЕНИЕ

В отдельных, еще малочисленных публикациях, было исследовано влияние электромагнитного излучения Солнца и магнитных бурь на сейсмичность [Барсуков, 1991; Соболев и др., 2001; Yesugey, 2009; Jeffrey, Jeremy, 2013; Тренькин, 2015]. В работе [Закржевская, Соболев, 2004] было продемонстрировано, что число землетрясений с магнитудами ≥ 3 возрастало в течение 2–7 сут после бурь в некоторых районах Средней Азии, Кавказа и Америки. Однако было отмечено отсутствие эффекта на Аляске. Исследовалось также влияние на сейсмический шум магнитных бурь [Sobolev, Zakrzhevskaya, 2019] и быстрых изменений атмосферного давления [Соболев, Закржевская, 2020]. Резкие изменения компонент напряженности магнитного поля практически одновременно сопровождалась импульсами шума на сейсмических станциях в разных районах мира. В настоящей работе изучался шум при сильных магнитных бурях уже в часовом диапазоне периодов. Используются ежесекундные записи широкополосных сейсмических станций IRIS, оснащенных сейсмометрами STS-1 [Wieland, Streckeisen, 1982]. Из базы GSNet_152.dat взяты данные по 58 станциям, которые непрерывно работали во время некоторых сильных магнитных бурь. Их расположение на глобусе показано на рис. 1. Канал LHZ каждой станции регистрирует вертикальную скорость смещения грунта; далее мы будем использовать более простой термин – скорость деформации.

МЕТОДИКА

На рис. 2а график Р демонстрирует приливные вертикальные перемещения земной поверхности, вычисленные для координат сейсмической станции PFO [33.60 с.ш.–116.45 з.д.] по программе PETGTAB [Wenzel, 1999] с дискретностью один отсчет в минуту. На графике dP приведена производная по времени, демонстрирующая ежеминутную скорость изменения прилива. График dS представляет скорость деформации на сейсмической станции PFO. Исходная запись с дискретностью 1 отсчет в секунду усреднена до 10 с и очищена фильтром Гаусса [Hardle, 1989; Любушин, 2007] с радиусом 30 от микросейсм секундного диапазона периодов. Далее она приведена осреднением к минутным отсчетам, а чувствительность уменьшена, чтобы приравнять размах dS к вариациям скорости изменения прилива dP. Таким образом, размах колебаний на оси ординат для dS представлен в условных единицах, удобных при вычислении разности между показаниями сейсмического канала и скоростью прилива. Из сопоставления графиков dS и dP следует, что станция отчетливо воспроизводит полусуточные и суточные колебания скорости прилива. Коэффициент корреляции значений dS и dP составляет 0.99. На графике dif приведена разность амплитуд $dif = dS - dP$. Результаты аналогичных расчетов для станции COR [44.586 с.ш.–123.303 з.д.] показаны на рис. 2б.

Амплитуда колебаний dif на разных станциях изменялась от 0.25 до 0.5 dP. Анализ формы таких вариаций приводит к предположению, что эти

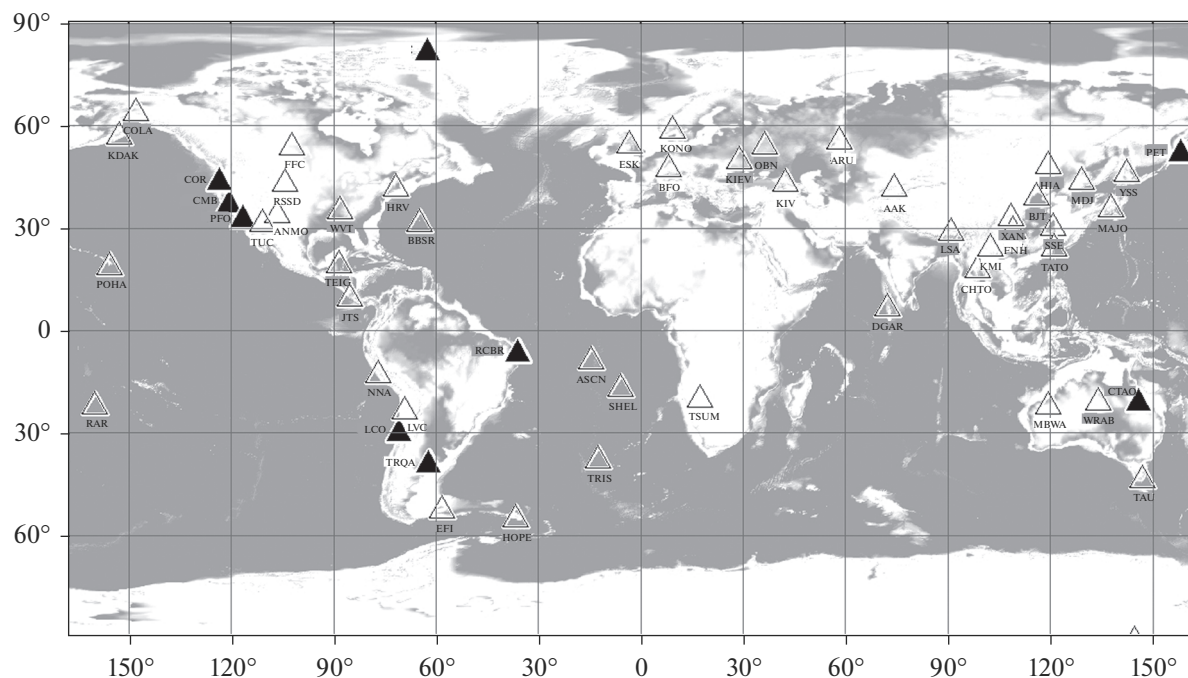


Рис. 1. Расположение проанализированных в работе широкополосных сейсмических станций; черным цветом обозначены станции, на которых обнаружен береговой эффект.

“остаточные” колебания вызваны разной реакцией сейсмической станции на вызванные приливами фазы растяжения и сжатия. Отличия диаграмм растяжения и сжатия твердых материалов хорошо известны [Малинин, 1975]. Величина “остаточных” колебаний зависит от неупругих свойств горных пород в области расположения конкретной станции, что не учитывается при расчете теоретического прилива. Из сопоставления графиков dif и P следует, что амплитуда dif не зависит от формы прилива. Таким образом, имеется возможность искать эффекты изменения деформаций вследствие других причин. Аналогия записей сейсмической станции и теоретически вычисленного прилива в некоторых случаях ухудшается. Известно, например, что на показаниях высокогорных станций сказываются колебания дневной и ночной температуры [Sobolev, Zakrzhevskaya, 2019]. Область равной и максимальной чувствительности широкополосного сейсмографа STS-1 лежит в диапазоне 0.2–360 с. На более длинных периодах чувствительность уменьшается на два порядка при 10-кратном удлинении периода. При периодах $>10^3$ с происходит постепенный переход свойств сейсмометра в свойства гравиметра [Рыков, 1979]. Это обусловлено воздействием силы тяжести на пружину маятника. При дальнейшем удлинении периодов чувствительность меняется мало, что позволяет надежно воспроизводить суточные колебания земных приливов (см. рис. 2а, б).

Сведения о сильных магнитных бурях получены из архива <http://www.spaceweatherlive.com>. В таблицах архива приведены значения планетарных Кр-индексов – отклонений магнитного поля Земли от нормы в течение трехчасовых интервалов соответствующих суток (GFZ Potsdam official Кр-index). Значения Кр-индексов лежат в диапазоне от 0 до 9. Во время очень сильных магнитных бурь значения Кр = 9 проявляются в нескольких трехчасовых интервалах. В архиве приведен список 50 сильнейших магнитных бурь, произошедших за период 1994–2017 гг. Они расположены в порядке убывания Ар-индексов. Последние вычисляются по восьми Кр-индексам за сутки, характеризуют среднесуточную планетарную амплитуду возмущения магнитного поля Земли в линейной шкале и измеряются в нанотеслах (нТл).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим на рис. 3 записи станций PFO [30, RSSD [44.12 с.ш.–104.04 з.д.], HRV [42.51 с.ш.–71.56 з.д.] во время бури 29–31 октября 2003 г. Видно, что в интервале больших значений Кр-индексов больше 8 на графиках станций RSSD и HRV проявлены высокочастотные всплески, которых не заметно на графиках станций COR и PFO. Мы проверили, не являются ли эти отличия следствием разной структуры магнитной бури в местах

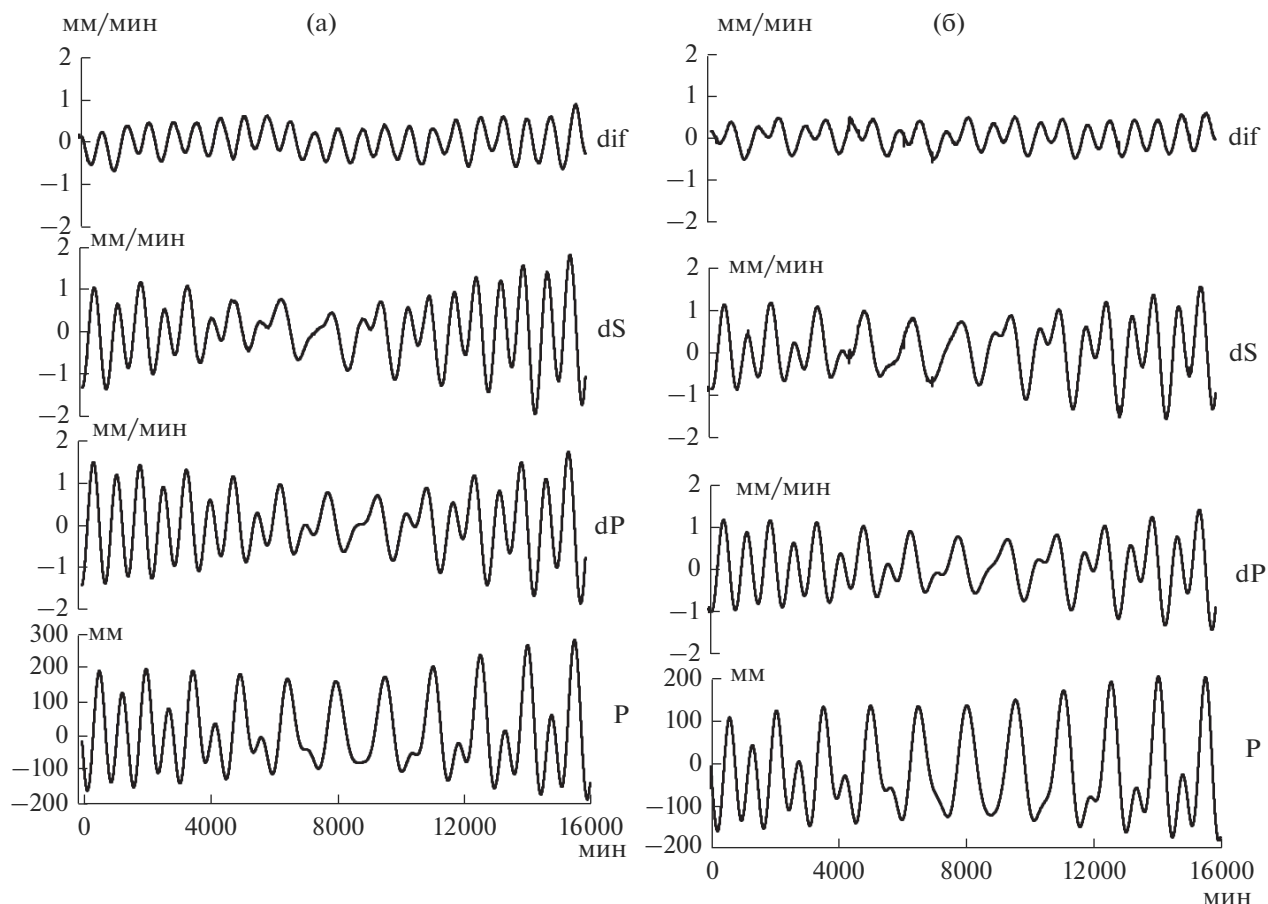


Рис. 2. Станции PFO (а) и COR (б).

P – прилив; dP – скорость изменения прилива; dS – запись сейсмической станции; dif = dS – dP.

расположения станций. Были использованы данные компонент напряженности магнитного поля из INTERMAGNET Data по ряду геомагнитных обсерваторий. На рис. 4 представлены записи геомагнитных обсерваторий FRN [37.09 с.ш.–119.72 з.д.], NEW [48.27 с.ш.–117.12 з.д.], BOU [40.14 с.ш.–105.24 з.д.]. Они расположены на расстояниях 134, 183, 130 км от сейсмических станций PFO, COR и RSSD. Взят четырехсуточный интервал с 28 по 31 октября, и первые пики на графиках соответствуют началу интенсивных колебаний, когда величины Kp-индексов превысили значения 8. Обратим внимание на следующую особенность записей. Высокочастотные вариации геомагнитных компонент ярче проявлены на обсерватории NEW вблизи сейсмической станции COR по сравнению с обсерваторией BOU, расположенной возле сейсмической станции RSSD. В то же время из рис. 3 следует, что высокочастотные сейсмические колебания наблюдались более отчетливо как раз на станции RSSD и малозаметны на станциях PFO, COR. Соответ-

ственно, причина их появления не объясняется структурой магнитного поля в буре. Возможно, причину нужно искать в изменениях свойств и водонасыщенности пород в области соответствующих станций.

Вызванные магнитными бурями сейсмические колебания минутного диапазона изучались нами по данным большого количества широкополосных сейсмических станций в работе [Sobolev et al., 2020], где были, в частности, сделаны следующие выводы. Возникавшие при бурях сейсмические импульсы наблюдались в записях всех станций, расположенных на континентах. Они отсутствовали на станциях, находящихся на небольших островах посреди глубоководного океана. Это объяснялось скин-эффектом поглощения электромагнитных колебаний высокопроводящей океанской водой и свидетельствовало, что источники возникновения сейсмических импульсов находятся в твердой земле. В настоящем исследовании мы не будем проводить анализ вариаций минутного диапазона периодов. Разде-

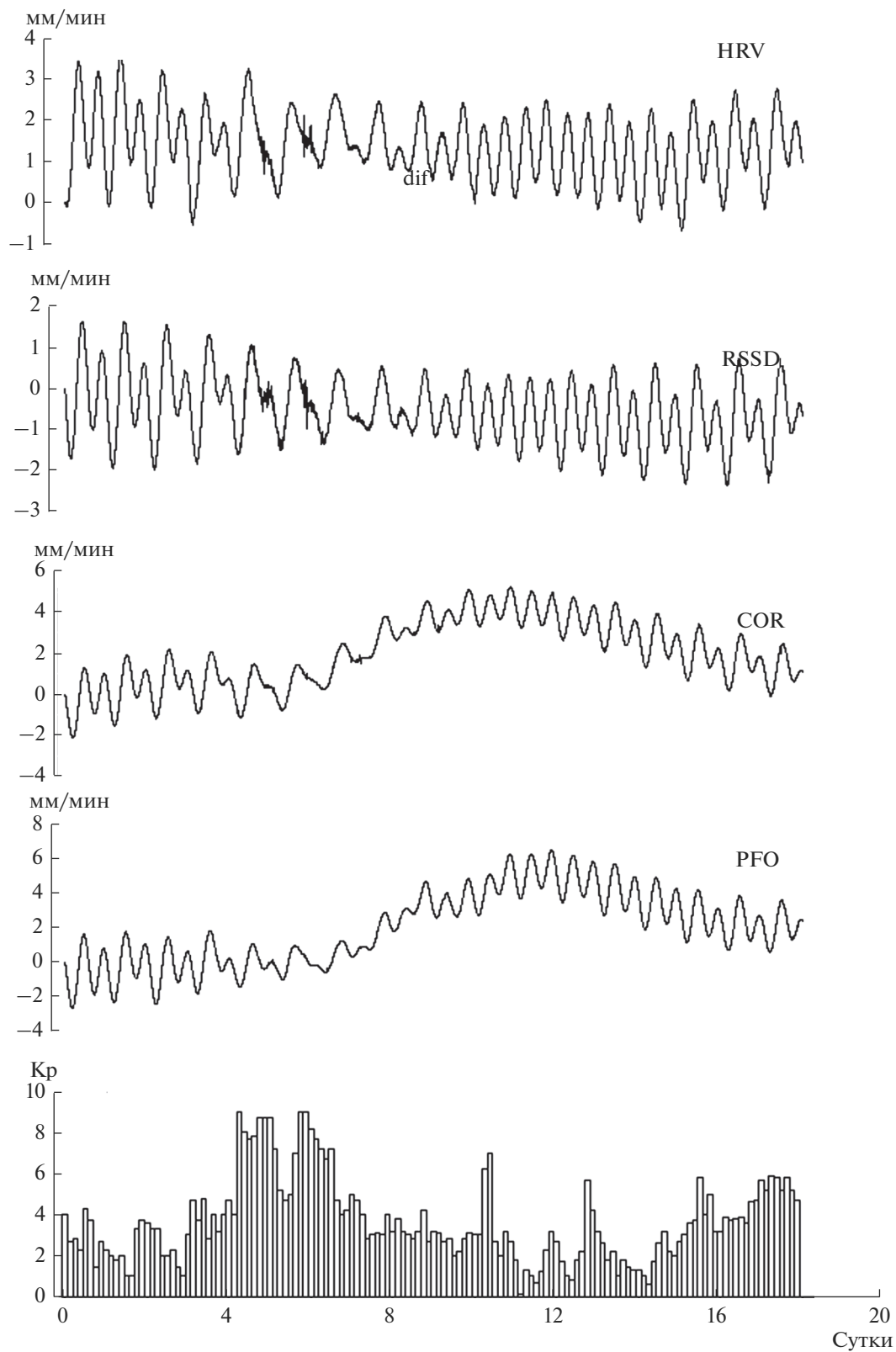


Рис. 3. Записи сейсмических станций, расположенных вблизи границы материк–океан (PFO, COR) и удаленных от нее (RSSD, HRV) во время бури 29–31 октября 2003 г.
 Кр – планетарные амплитуды Кр-индексов, характеризующие интенсивность бури.

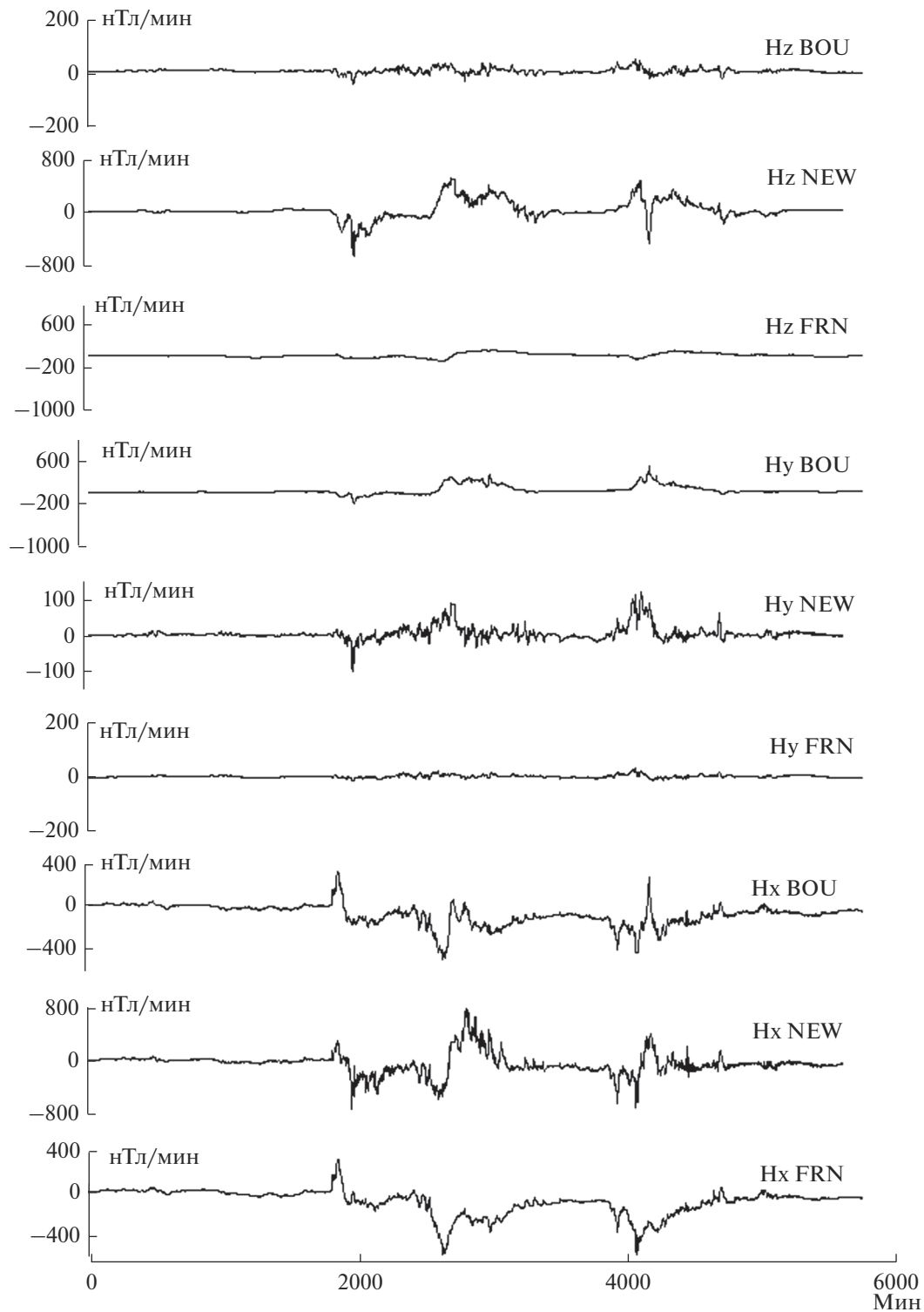


Рис. 4. Изменения компонент напряженности магнитного поля во время бури 29–31 октября 2003 г. на геомагнитных обсерваториях FRN, NEW, BOU, расположенных вблизи сейсмических станций PFO, COR, RSSD.

лим исходные ряды наблюдений на 2 поддиапазона, используя фильтр Гаусса с радиусом 90 мин. Спектральный анализ показал, что в более высокочастотном поддиапазоне отчетливо выделяются

импульсы с периодами от 6 до 30 мин, а в низкочастотном — 12 и 24 ч. Названия низкочастотных рядов наблюдений при дальнейшем анализе будем дополнять цифрами 90.

*Вариации деформаций в часовых
диапазонах периодов*

Времена появления и прекращения больших планетарных K_p -индексов (>8) будем условно называть терминами начала и конца бури. Каждый K_p -индекс определялся, как указывалось выше, в трехчасовом окне; на рис. 3 они занимали интервал 4.2–6.8 сут. Не останавливаясь на высокочастотных импульсах (станции RSSD и HRV), отметим, что в часовом диапазоне (станции PFO и COR) не видно явных изменений во время начала бури ($K_p > 8$). Поставим вопрос: можно ли формализованно их обнаружить? Скорость деформации dS с высокой точностью описывает изменения земного прилива dP , что отмечалось на рис. 2а, б. Предположим, что вызванный земным приливом регулярный процесс будет нарушен во время бури. Изучим возможность выявить это при вычислении меры когерентности разных рядов наблюдений. Под когерентностью в физике понимается согласованность нескольких колебательных процессов во времени.

Используем программу А.А. Любушина *WBRCM.exe*, любезно предоставленную автором [Любушин, 2007]. Робастная вейвлетная мера когерентности вычислялась по формуле:

$$k(\tau, \beta) = \prod_{k=1}^q |\bar{v}_k(\tau, \beta)|, \quad (1)$$

где $v_k(\tau, \beta)$ – коэффициент, описывающий силу связанности процесса с номером k со всеми прочими сигналами; τ – временная координата правого конца скользящего временного окна, β – уровень детальности вычисления коэффициентов $c_j^{(\beta, \tau)}(k)$ дискретного ортогонального вейвлет-преобразования. Временная “зона ответственности” коэффициента $c_j^{(\beta, \tau)}(k)$ определяется степенным законом $\Delta T = 2^\beta$. Вычисляется также минимально возможное значение числа вейвлет-коэффициентов L_{\min} для уровня детальности с номером β , при котором допустимо вычисление корреляций. Значения меры (1) могут лежать в пределах от 0 до 1. Чем больше значение $k(\tau, \beta)$, тем сильнее совокупная связь между анализируемыми процессами. Величина меры представляет произведение q неотрицательных величин по модулю меньших 1. Наибольший интерес представляют не абсолютные значения, а относительные величины для различных τ . В ниже представленных результатах число вейвлет-коэффициентов было выбрано $L_{\min} = 14$ и вычислялись Sym02 вейвлеты HAAR. Более устойчивые результаты были получены при сопоставлении разностей последовательных значений в каждой из выборок.

Для оценок меры когерентности мы применили следующую схему. В записи выбранной стан-

ции выделялись 3 последовательных интервала, сдвинутых во времени на 1440 мин (1 сут), и вычислялась величина $k(\tau, \beta)$ при их совместном анализе в движущемся окне со сдвигом 1 мин. Предполагалось, что эта мера будет иметь высокие значения, если процесс описывается повторяющимися в течение трех последовательных суток периодическими колебаниями вследствие земного прилива. Влияние дополнительного источника (магнитной бури), нарушающего приливный процесс, должно было приводить к уменьшению меры когерентности. Количественные результаты вычислений $k(\tau, \beta)$ будем обозначать знаком **ког** (когерентность).

Использование описанной схемы для выявления изменений деформационного процесса во время бури было целесообразно в тех случаях, когда в записях сейсмических станций не было пропусков или техногенных помех. Рассмотрим на рис. 5 результаты анализа в интервале 22 октября–11 ноября 2003 г. на примере станции RSSD, находящейся в центре Северной Америки (см. рис. 1). Здесь и далее кривые черного цвета демонстрируют скорость деформации dS и меру когерентности **ког** по данным сейсмической станции; графики красного цвета представляют результаты аналогичных вычислений по данным теоретического прилива. Начальные значения графиков **ког** сдвинуты на 4320 мин, ушедших на вычисление $k(\tau, \beta)$ в первом из движущихся трех суточных окон. В результате все графики синхронизированы по времени. Треугольники указывают на время начала и конца бури 29–31 октября в интервале $K_p > 8$. Видно, что на протяжении первых 7 сут (~ 10000 мин) до бури мера когерентности имела близкие к 1 значения, указывая на высокую степень периодичности процесса. Понижение меры началось в то время, когда правый конец движущегося трехсуточного окна достиг начала бури. Затем мера когерентности продолжала падать на протяжении 4-х сут, указывая на все большее рассогласование процесса в последовательных интервалах. Минимум **ког** отмечен через двое суток после конца бури (второй треугольник). Полученный результат означает, что буря привела к изменению скорости деформаций.

Однако во время бури изменялась форма скорости колебаний прилива, что видно на графике RSSD красного цвета. Это, естественно, должно было сказаться на вариациях меры когерентности по вышеописанной программе *WBRCM.exe*. Результат расчета только по кривой прилива показан на графике **ког** красной линией. Большая разность амплитуд **ког** (графики черного и красного цвета) позволяет сделать вывод, что изменения деформации во время бури не вызваны только формой прилива.

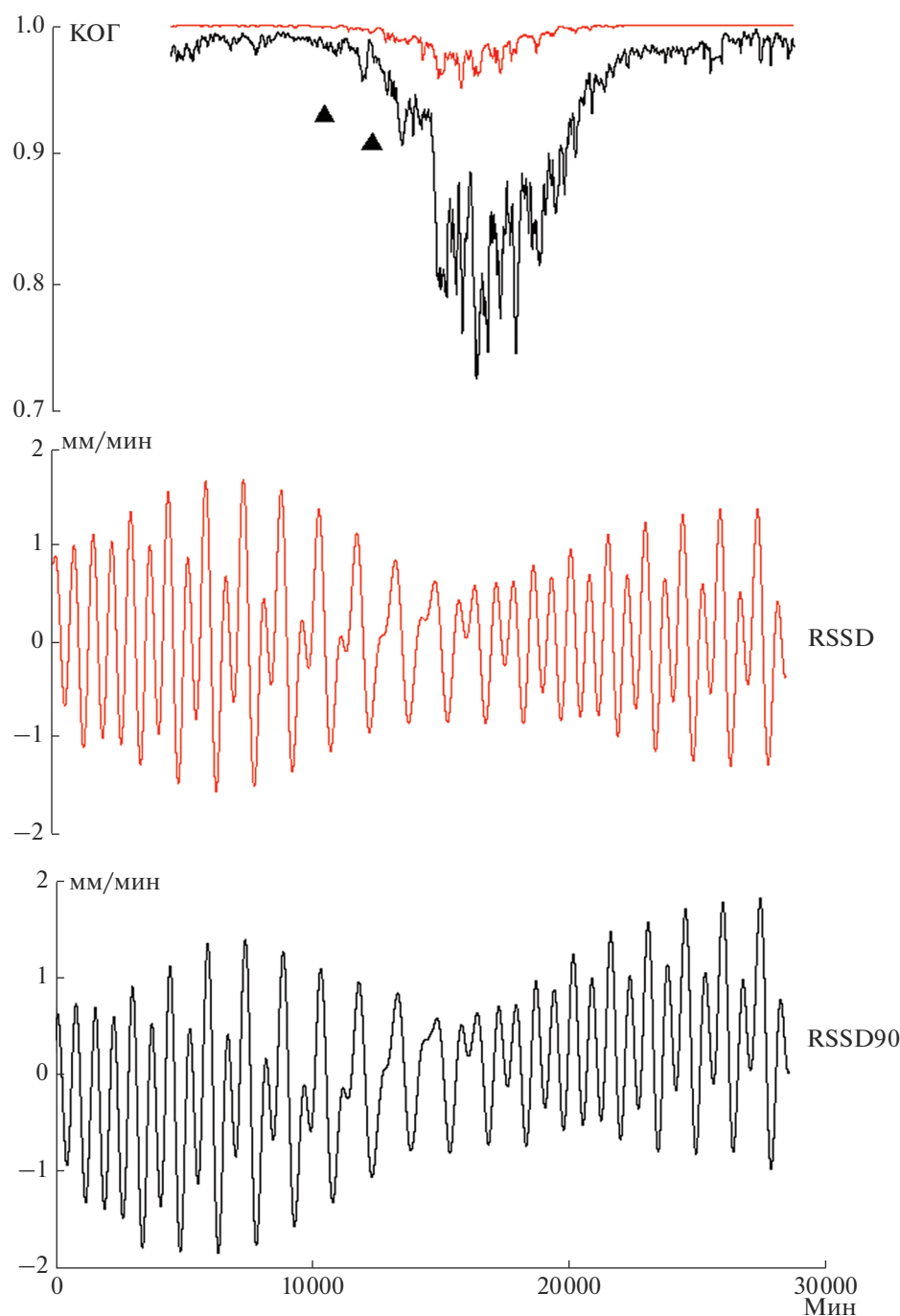


Рис. 5. Уменьшение меры когерентности **ког** последовательных суточных участков записи станции RSSD во время бури 29–31 октября 2003 г. (черный цвет). Красным цветом показаны результаты аналогичных расчетов по записи прилива. Треугольники указывают на время начала и конца бури в интервале Кр-индексов >8.

Результаты аналогичных вычислений для станции COR представлены на рис. 6. Эта станция расположена на западе Северной Америки, на расстоянии 1500 км от станции RSSD. Так же как и для станции RSSD, аномальное понижение величины меры когерентности в скорости деформации в несколько раз превышает изменение

только за счет формы прилива. Следующий рис. 7 демонстрирует картину изменений когерентности в записях станции RAR, находящейся на о. Раратонга в глубоководной части Тихого океана. Здесь мы видим меньшие изменения в амплитуде **ког** во время магнитной бури. Если на материке и в прибрежной к океану области (см. рис. 5,

б) минимальные амплитуды достигали значений 0.7–0.8, то на станции RAR уменьшение составило всего 0.92. В работе [Соболев и др., 2020] было установлено, что на расположенных в океане небольших островах во время магнитных бурь не обнаруживались сейсмические импульсы в минутном диапазоне периодов. Теперь мы видим, что в часовом диапазоне влияние бури на скорость деформации на острове меньше, чем на материке. Возможно, это связано с тем, что электромагнитные колебания преобразуются в деформации в основном под островом, а в окружающих слоях под ложем океана их энергия уменьшена скин-эффектом высокопроводящих пород. На рис. 8 представлены результаты изменения скорости деформации на расположенных в разных местах земного шара станциях: SSE [31.095 с.ш.—121.186 в.д.] (восток Китая), CMB [38.035 с.ш.—120.386 з.д.] (запад США) и SNZO [41.310 ю.ш.—174.705 в.д.] (Новая Зеландия). Эффект уменьшения меры когерентности проявлен четко и в первом приближении не зависит от местоположения станций.

Отметим общие свойства исследуемого явления. В интервалах до начала бури все станции демонстрировали близкие к 1 значения *ког*, что отражало устойчивую периодичность процесса, контролируемого земным приливом. Начало падения меры когерентности совпадает с началом магнитной бури с точностью примерно ± 2 ч. Такой разброс проистекает вследствие следующих причин: а) величина Кр-индексов вычисляется как среднее значение в трехчасовом интервале, б) понижение *ког* происходит не ступенчато, а плавно. Если знак минус в оценке разброса имеет физический смысл, то это означает, что понижение меры когерентности начинается раньше магнитной бури. Заметим в связи с этим, что в работе [Тарасов, 2019] автор обнаружил изменения потока землетрясений еще до вариаций напряженности геомагнитного поля во время магнитных бурь. Он связывал это с приходом к Земле порожденного солнечной вспышкой ионизирующего электромагнитного излучения Солнца. Постепенное падение на рис. 5–8 меры когерентности после магнитной бури, очевидно, вызвано тем, что изменения скорости деформации занимают все больший интервал в движущемся трехсуточном окне. Возвращение к высоким значениям свидетельствует об уменьшении влияния бури на деформацию.

Результаты по всем станциям на качественном уровне совпадают. На настоящем этапе исследований установлен только сам факт изменения деформаций. Не ясно, какие параметры и какой величины меняются. Например, расчеты длительности промежутков между последовательными максимумами или минимумами от средних (1440 мин) показали, что отличия не выходят за уровень случай-

ного разброса данных. В этом смысле, примененная методика вычисления когерентности продемонстрировала эффективную избирательную способность. В итоге, мы можем с большой долей уверенности сказать, что буря вызвала тектонические деформации в часовом диапазоне периодов в разных районах земного шара. Предполагаемая геофизическая причина — появление дополнительного к приливу источника.

Береговой эффект в тектонических деформациях

При анализе скорости деформации по данным 58 станций, исправно работавших в период магнитной бури 29–31 октября 2003 г. на некоторых из них было обнаружено изменение тренда записей после бури. Вернемся к рис. 3 и сравним записи после бури близких к восточному берегу Тихого океана станций PFO (100 км от берега), COR (96 км) и более удаленных — RSSD (1600 км) и HRV (4050 км). Аналогия в развитии тренда записей прибрежных станций PFO и COR и отсутствие его изменений на станциях RSSD и HRV свидетельствует о существенной роли границы раздела океан–материк.

Сопоставим на рис. 9 записи показавших изменение тренда прибрежных станций с вариациями других геофизических процессов, которые могли повлиять на данный эффект. График 1 демонстрирует развитие бури 29–31 октября 2003 г. по уровню Кр-индексов. Структура сейсмических колебаний dS представлена на североамериканских станциях PFO и COR и находящейся примерно на той же широте в восточном полушарии станции PET (графики 2, 3, 4). Над графиками приведены координаты и высота расположения этих станций. Они находятся в прибрежных областях Тихого океана. Обе американские станции PFO и COR показали почти синхронное возрастание уровня тренда после высоких значений $Kp > 8$. Длительность нарастания уровня тренда до последующего спада составила примерно 5 сут. Расстояние между станциями PFO и COR (см. рис. 1) равно 1350 км; разница в высоте их расположения $dH = (1311 - 121 \text{ м})$ превышает 1 км. Таким образом, изменение тренда прослеживается вдоль восточного побережья Тихого океана более чем на 1000 км и не связано с высотой расположения станции. На расположенной в другом полушарии станции PET изменение тренда также проявилось, хотя и в другой конфигурации. С учетом удаленности станций от берега, зона его распространения вглубь материка превысила 100 км.

Длительность изменений тренда на графиках 2, 3, 4 лежит в диапазоне двухнедельных колебаний земных приливов. В связи с этим по программе PETGTAB [Wenzel, 1999] были рассчитаны приливы в точках расположения станций PFO, COR PET; они представлены на графиках 5, 6, 7

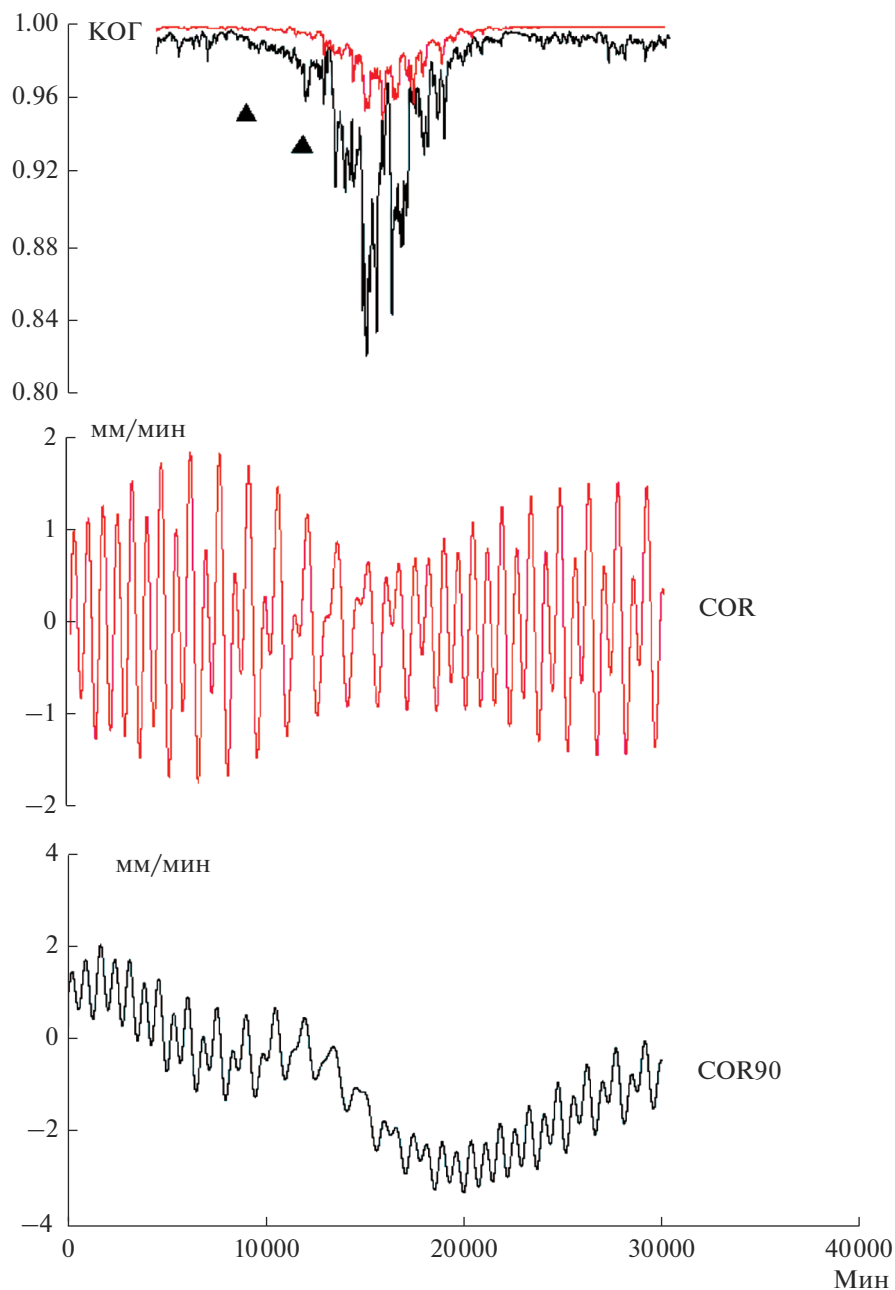


Рис. 6. Уменьшение меры когерентности **ког** последовательных суточных участков записи станции COR во время бури 29–31 октября 2003 г. (черный цвет). Красным цветом показаны результаты аналогичных расчетов по записи прилива. Треугольники указывают на время начала и конца бури в интервале Кр-индексов >8.

красным цветом. Для сопоставления трендов полусуточные и суточные колебания были подавлены фильтром Гаусса с радиусом 4320 отсчетов (трое суток). Значимой попарной корреляции трендов между записями скорости деформации (2, 3, 4) и приливов (5, 6, 7) не обнаружено. Еще одной причиной изменений тренда могли бы быть вариации погодных условий. Для проверки этого предположения были получены часовые

значения атмосферного давления $P_{\text{атм}}$ по данным близких к PFO, COR, PET метеостанций Palm Springs [33.82°N, 116.55°W], Corvallis [44.56°N, 123.28°W], Elizovskoe [53.15°N, 158.45°E]. Значимой корреляции их структуры (графики 8, 9, 10 синего цвета) с часовыми значениями скорости деформации (графики 2, 3, 4) также не найдено. Приходим к предположению, что в регистрируемых прибрежными сейсмическими станциями

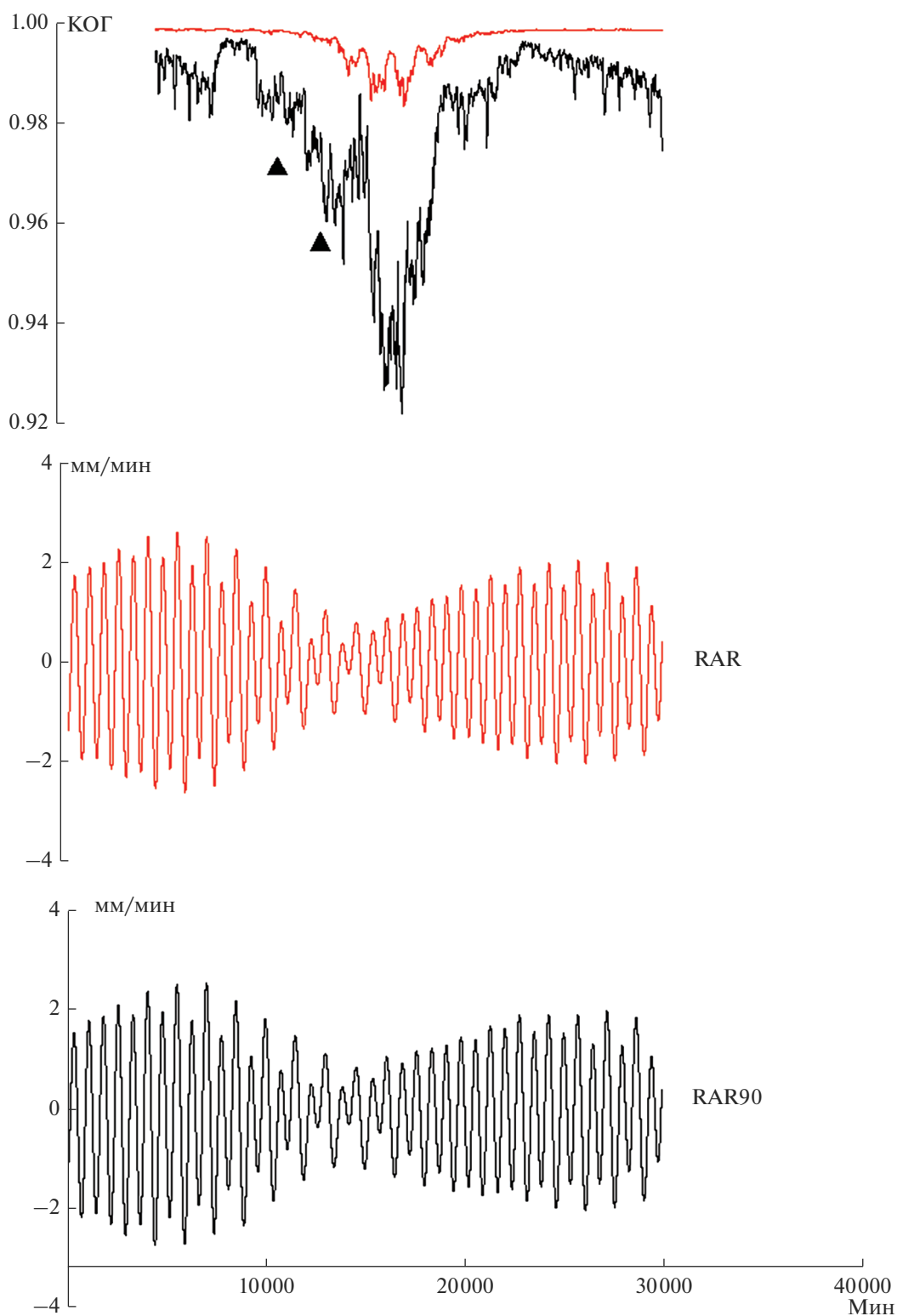


Рис. 7. Уменьшение меры когерентности *ког* последовательных суточных участков записи станции RAR во время бури 29–31 октября 2003 г. (черный цвет). Красным цветом показаны результаты аналогичных расчетов по записи прилива. Треугольники указывают на время начала и конца бури в интервале Кр-индексов >8.

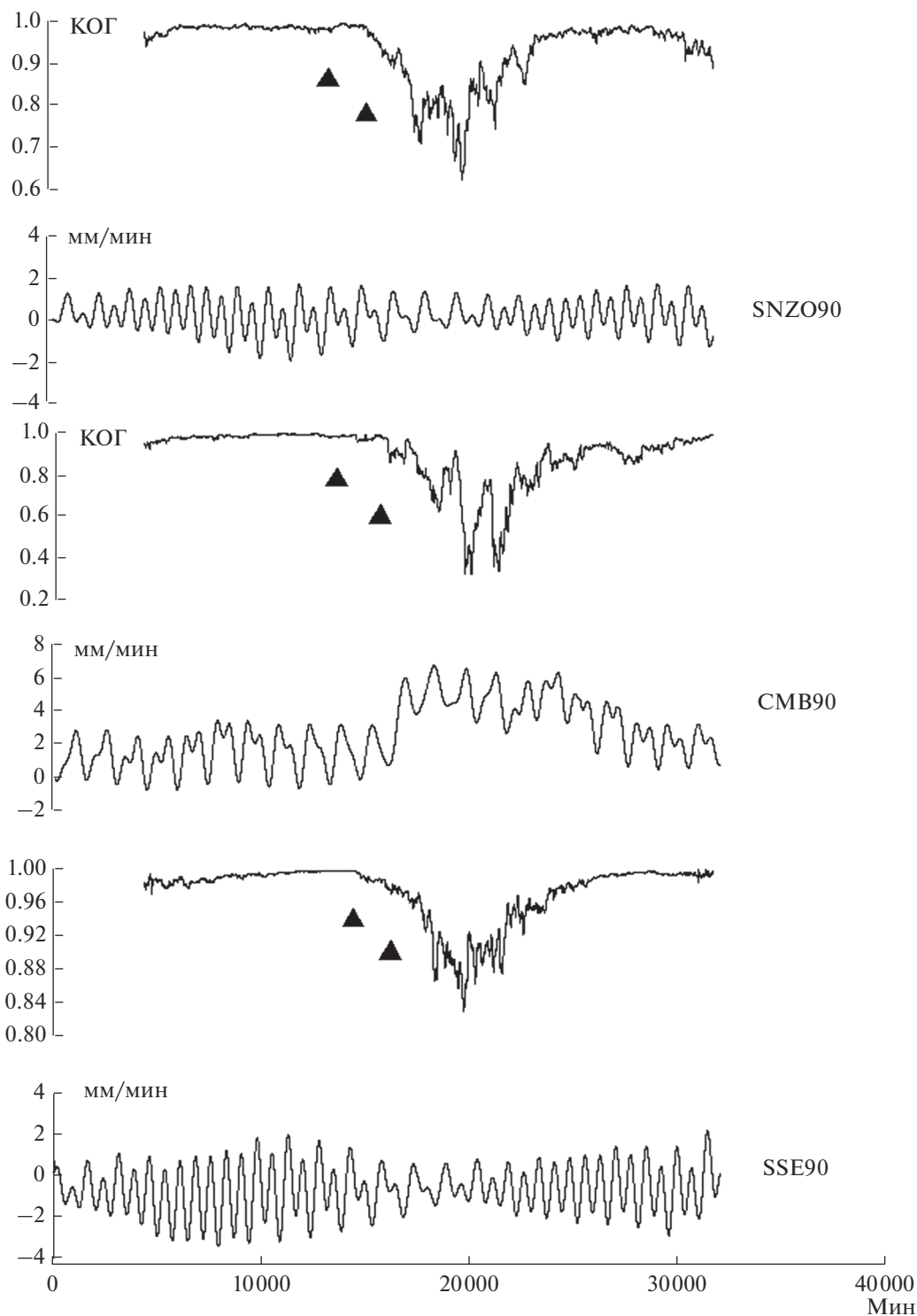


Рис. 8. Уменьшение меры когерентности *ког* последовательных суточных участков записей станций SSE, CMB, SNZO во время бури 29–31 октября 2003 г. Треугольники указывают на время начала и конца бури в интервале Кр-индексов >8.

тектонических деформациях отражается “береговой” эффект [Parkinson, 1962; Мороз, Самойлова, 2017]. До этого он был кратко представлен в нашей предыдущей работе [Соболев, 2020].

Рассмотрим на рис. 10 это явление в более длительном интервале наблюдений. Приведены записи трех станций, в работе которых на протяжении нескольких месяцев не было перерывов или

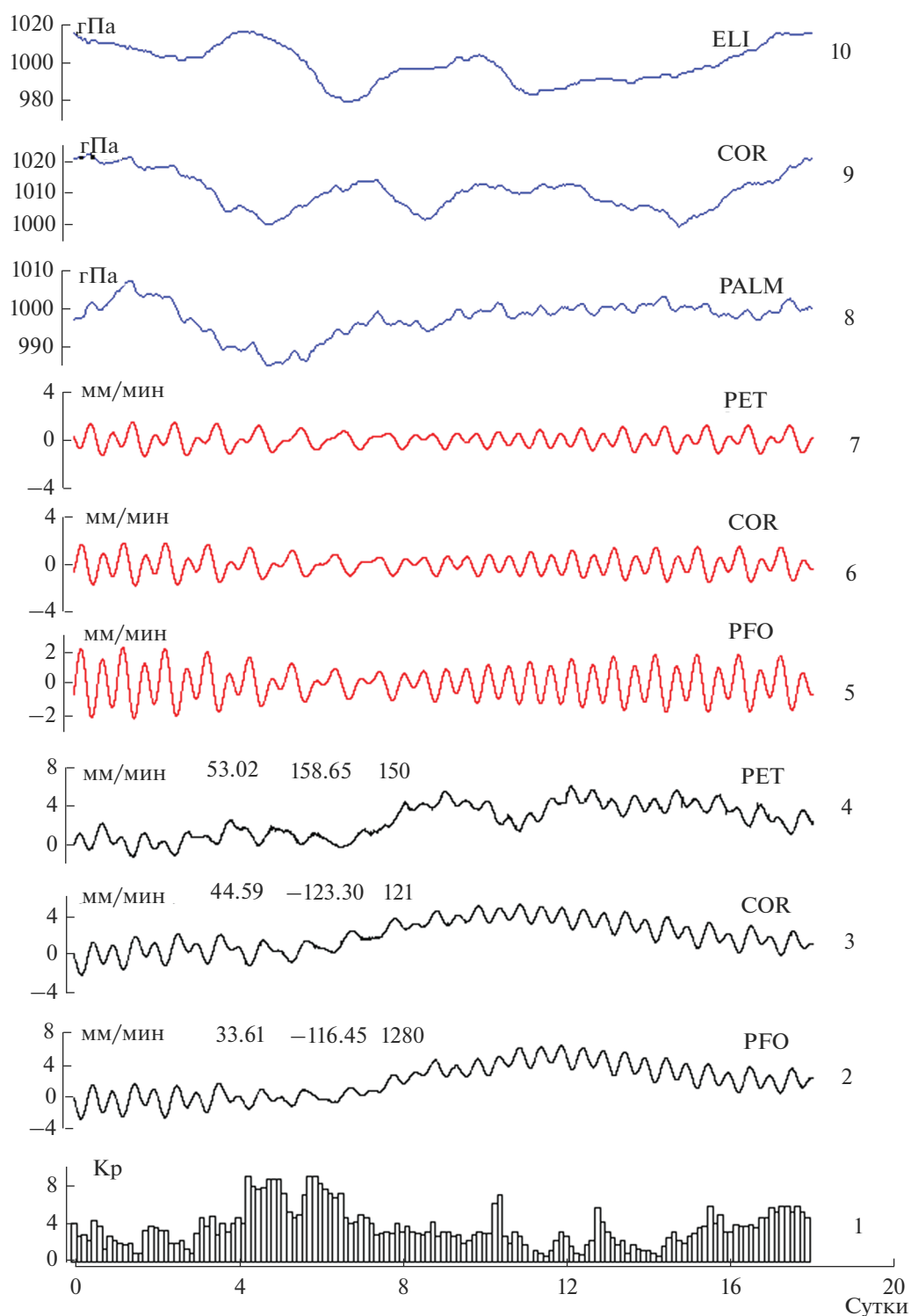


Рис. 9. Вариации различных геофизических параметров во время магнитной бури 29–31 октября 2003 г. 1 – Кр – интенсивность бури; изменения – 2–4 – скорости деформации и 5–7 – земного прилива на сейсмических станциях PFO, COR, PET; 8–10 – изменения атмосферного давления на близко расположенных к ним метеостанциях PALM, COR, ELI.

техногенных помех перед бурей 29–31.10.2003 г. Графики на рис. 10 охватывают интервал с 1 сентября по 11 ноября 2003 г. и представляют минутные значения dS на станциях PFO, COR и RSSD. Более темные участки с повышенными амплитудами полусуточных и суточных колебаний соответствуют двухнедельным циклам земного прилива. Видимые в записях станции COR вариации длительностью примерно 3 недели, возможно, связаны с локальными условиями данной станции и в рамках настоящей работы не исследуются. Для нас важны следующие особенности: а) проявлены изменения тренда после бури (треугольники) на станциях PFO и COR, б) отсутствуют столь явные изменения тренда на станции RSSD. Эти факты также соответствуют предположению о влиянии берегового эффекта на деформации, регистрируемые прибрежными к океану станциями.

Является ли изменение тренда свойством станции, оснащенной сейсмометром STS-1? На расположенных в прибрежной зоне материк–океан станциях PFO и ALE кроме сейсмометров STS-1 одновременно работали во время бури 29–31.10.2003 г. также сейсмометры другого типа – STS-2. (рис. 11). Максимальная чувствительность последних ограничена периодами ≤ 100 с, но все же они регистрируют суточные и полусуточные колебания. График 2 на рис. 11 повторяет график 2 на рис. 9 (STS-1), а график 3 относится к сейсмометру STS-2. Видим, что изменения тренда после бури проявлены в записях обоих инструментов. Графики 4, 5 на рис. 11 относятся к станции ALE [82.50 с.ш.–62.558 з.д.], расположенной в Арктике на берегу Северного Ледовитого океана (см. рис. 1). Искажения тренда после бури также проявлены на обоих приборах. Более резкие изменения тренда после бури на станции ALE по сравнению со станцией PFO связаны, по-видимому, с большей интенсивностью бури вблизи ALE. По данным INTERMAGNET, напряженность магнитного поля на высокоширотной обсерватории THL [77.47 с.ш.–69.29 з.д.] – вблизи ALE была в течение бури в 5 раз выше по сравнению с обсерваторией FRN [37.09 с.ш.–119.72 з.д.] – вблизи PFO. Броски наиболее интенсивных горизонтальных компонент H_x характеризовались, соответственно, величинами 2000 и 400 нТл.

Изучение записей других, расположенных на берегу материк–океан станций показало, что структура, амплитуда и полярность вариаций тренда после бури на разных станциях различались. Береговой эффект той или иной формы и амплитуды обнаружен в записях следующих станций: COR (запад Америки), PFO (запад Америки), ALE (северо-восток Канады), CMB (запад Америки), СТАО (северо-восток Австралии), LCO (запад Южной Америки) TRQA (запад Южной Америки), RCBR (восток Южной Америки).

В записях не искаженных пропусками или помехами прибрежных станций SSE (восток Китая) и NNA (запад Южной Америки) эффект не удалось выявить.

Не было возможности изучить большое количество береговых станций из-за пропусков исходных ежесекундных данных. На основании анализа записей выше перечисленных станций сложилось впечатление, что береговой эффект лучше проявляется в относительно прямолинейных продолжительных прибрежных полосах материк–океан. На Западе Северной Америки область его проявления в меридиональном направлении протянулась более чем на 1000 км.

Изменения в регистрируемых станциями деформациях и проявление берегового эффекта отмечены и при других бурях. Серьезным ограничением было принятое нами условие использовать при многосуточном анализе ежесекундные данные без пропусков и сбоев, исключив любую аппроксимацию. Приведем на рис. 12 пример, когда при буре 27.07.2004 устойчиво работала та же станция COR, результаты по которой анализировались при буре 29–31.10.2003. Эффекты искажения скорости деформаций и изменения тренда проявлены в обоих случаях. Есть и отличия. При буре 27.07.2004 падение величины меры когерентности **ког** проявилось позже максимальных значений K_p -индексов, и длительность подъема–спада тренда была короче. Возможно, это объясняется следующими причинами: а) буря 27.07.2004 имела меньшую интенсивность ($K_p = 8.6$, $A_p = 186$) по сравнению с бурей 29–31.10.2003 ($K_p = 9$, $A_p = 204$); б) она развивалась с постепенного нарастания величины K_p -индексов (от 7 до 8.6), в то время как буря 29–31.10.2003 начиналась с максимального значения $K_p = 9$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление меры когерентности **ког** разных участков записи скорости деформации dS по данным широкополосных сейсмических станций показывает, что **ког** уменьшается во время магнитных бурь по сравнению с предыдущим фоном. До начала бури станции демонстрируют близкие к 1 значения **ког**, что отражает устойчивую периодичность процесса. Начало падения меры когерентности, в первом приближении, совпадает с появлением высоких амплитуд K_p -индексов (> 8), характеризующих силу бури. Интервал низких значений **ког** продолжится несколько суток. Данный эффект искажения контролируемых земным приливом квазипериодических деформаций свидетельствует, по-видимому, о воздействии во время бури дополнительного к приливу источника.

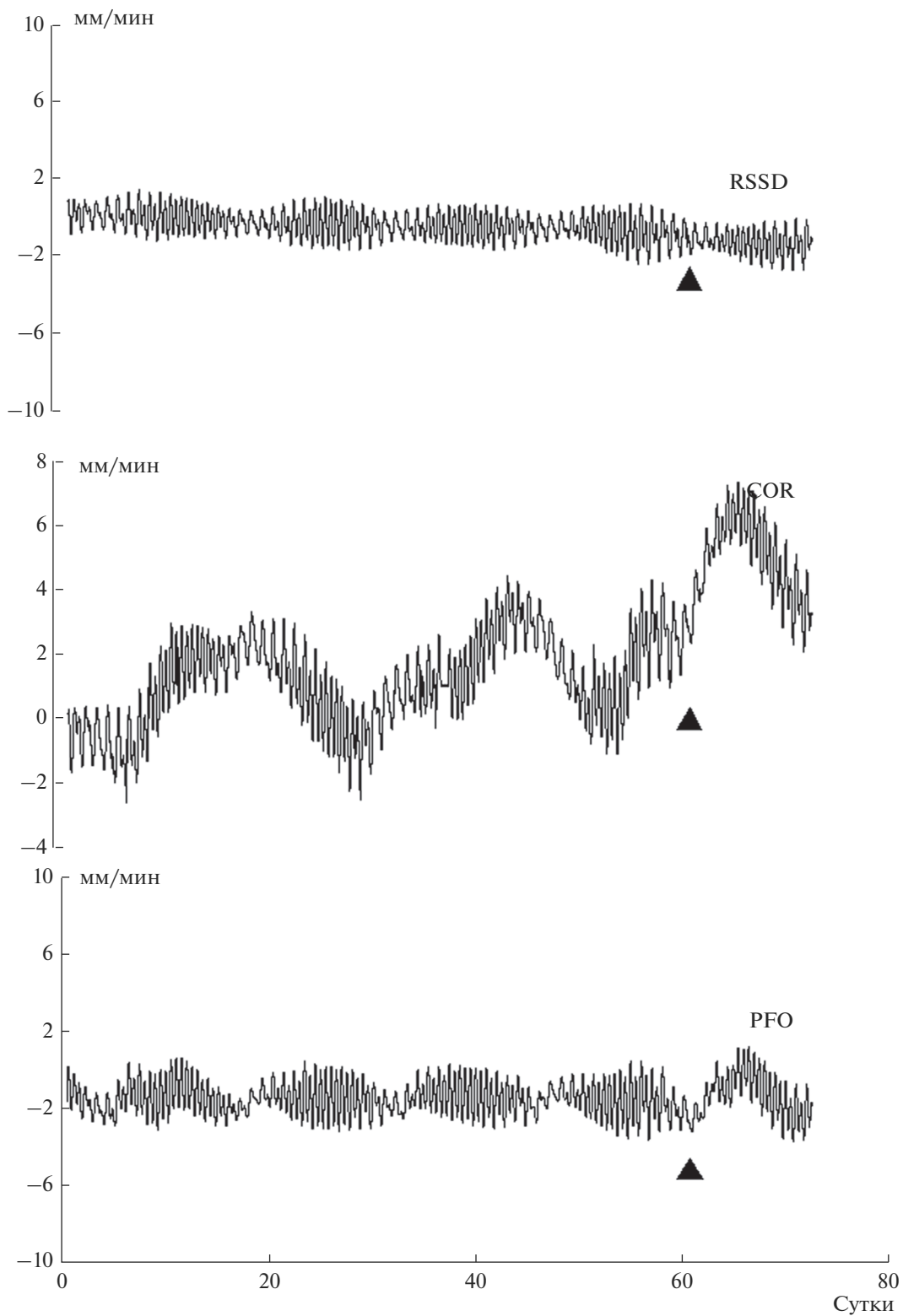


Рис. 10. Долговременные изменения скорости деформации dS на станциях PFO, COR, RSSD до и после бури 29–31.10.2003. Треугольник обозначает начало бури.

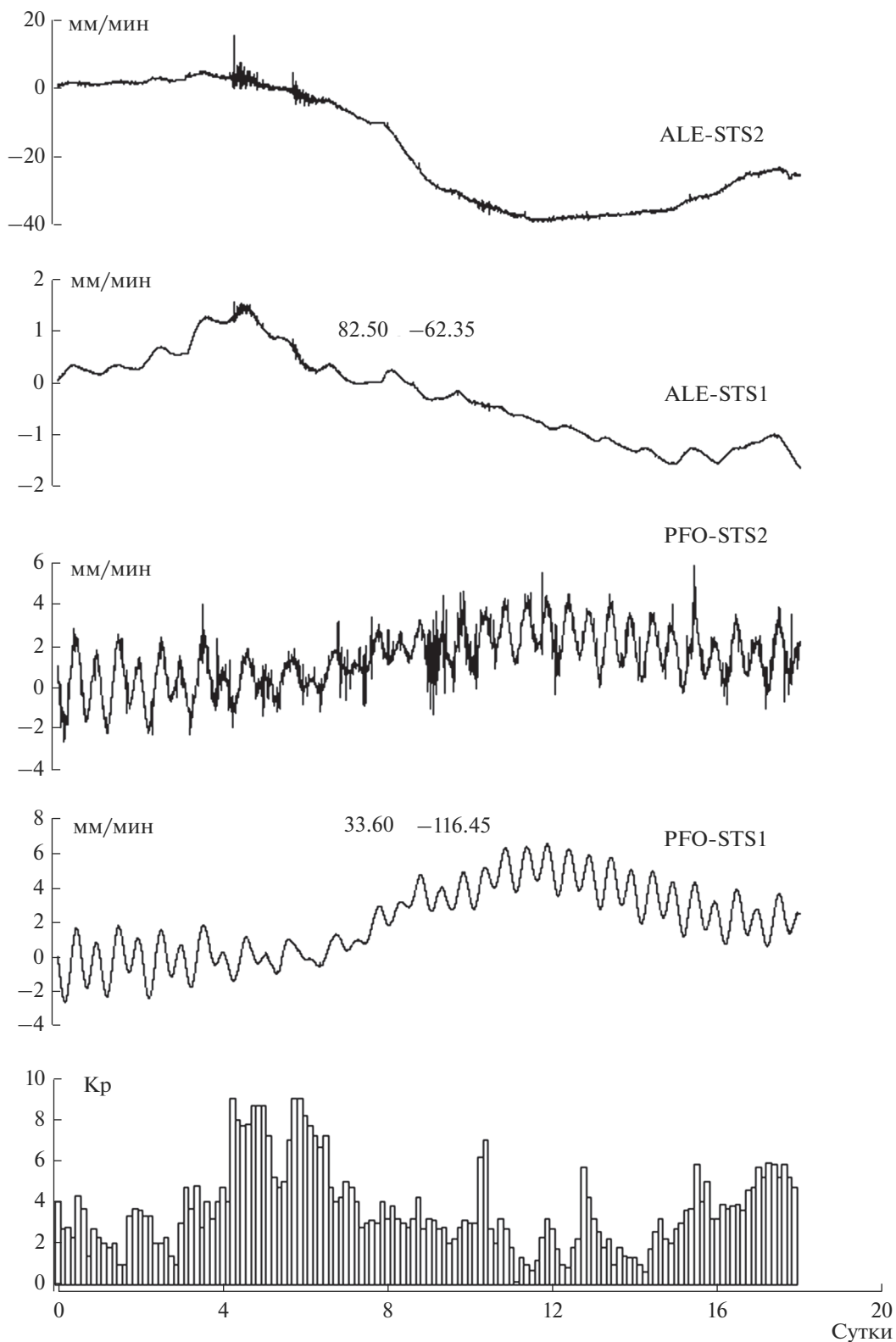


Рис. 11. Проявления трендов после бури 27–31.10.2003 на станциях PFO и ALE с сейсмографами STS-1 и STS-2. Координаты станций указаны над графиками; знаки минус относятся к западной долготе. Kp – интенсивность бури.

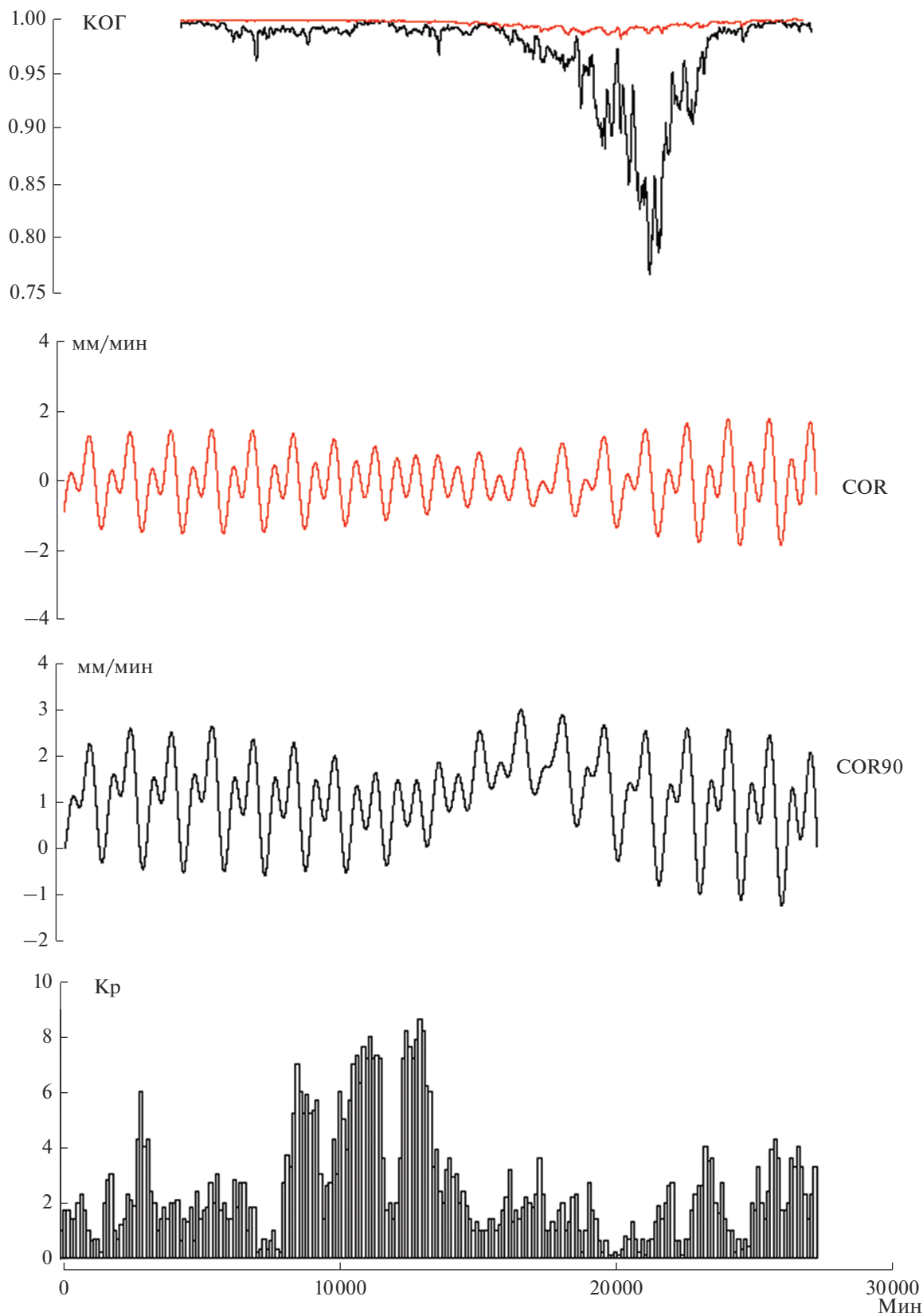


Рис. 12. Уменьшение меры когерентности **ког** последовательных суточных участков записи станции COR во время бури 27.07.2004 г. (черный цвет). Красным цветом показаны результаты аналогичных расчетов по записи прилива. Кр – интенсивность бури.

В литературе неоднократно описывались случаи влияния магнитных бурь на землетрясения и сейсмический шум. В качестве источников преобразования в твердой Земле упоминались пьезоэлектрический, сейсмоэлектрический, тектономагнитный эффекты, явления электрической поляризации и другие. Представленные в настоящей работе результаты позволяют привести аргументы в пользу влияния воды. Изменения во время бури деформаций проявлены на разных станциях примерно на одном и том же уровне, несмотря на различия в составе окружающих станцию горных пород. Например, под станциями PFO, COR и RSSD залегают, соответственно, песчаники морского происхождения, вулканогенные породы и известняки.

Проявление берегового эффекта указывает на преобразование: электрический ток—вода. В основе лежит геомагнитный береговой эффект, который изучался неоднократно [Мардерфельд, 1977; Бердичевский и др., 1992; Мороз, Самойлова, 2017]. Он связан с концентрацией электрических токов в береговой зоне между высокопроводящей (океан) и низкопроводящей средой (материк). Следствием является увеличение амплитуды теллурических токов на прилегающей к берегу суше. Судя по оценкам электропроводности различных слоев литосферы с применением метода магнитотеллурического зондирования, влияние геомагнитного берегового эффекта сказывается до глубин в сотни километров.

Ключевую роль механизма преобразования электрического поля в деформации играют электрокинетические явления. Усиление токов ведет к изменению скорости фильтрации жидкости вследствие электроосмоса. Лабораторные эксперименты показывают, что скорость фильтрации возрастает пропорционально увеличению силы тока [Соболев и др., 2020]. Повышение скорости фильтрации ведет к ряду явлений, имеющих прямое отношение к вариациям тектонических деформаций. Их природа различается в зависимости от степени насыщенности пород глубинным флюидом, содержание которого в литосфере существенно меняется [Родкин, Рундквист, 2017]. В условиях неоднородного сжатия в заполненных жидкостью породах может возрастать внутривещное давление. Это ведет к изменению эффективных тектонических напряжений в соответствии с модифицированным законом Кулона—Мора и, как следствие, к процессам микроразрушения. Заполнение пор относительно сухих пород приводит к изменению плотности. Разнообразие, величины и закономерности разных механизмов обсуждались при изучении взаимосвязей геофизических полей [Adushkin, Spivak, 2019] и в лабораторной работе [Smirnov et al., 2020].

Эффективность влияния перечисленных механизмов на формирование берегового эффекта тектонических деформаций не известна. Она, очевидно, зависит от состава и свойств, слагающих литосферу горных пород. Величины вышеописанных изменений деформаций также не могут быть оценены аккуратно, так как мы не знаем чувствительность широкополосного сейсмометра в суточном диапазоне периодов. Но из рис. 3, 8, 10 и других следует, что изменения скорости деформации во время и после бури соизмеримы с вариациями земного прилива. Последние характеризуются величинами ~ 2 мм/мин при колебаниях высоты прилива на 400 мм (200 мкГал) [Мельхиор, 1968]. Зарегистрированные вариации тектонических деформаций такой величины объяснимы, если пористость горной породы с плотностью 3.5 г/см³ изменилась под сейсмической станцией всего на $10^{-3}\%$ в слое мощностью 1 км. Заметим, что вызванные береговым эффектом изменения силы тяжести могли бы быть измерены абсолютным гравиметром, установленным возле береговой линии.

ВЫВОДЫ

Выявлены изменения во время бури тектонических деформаций, вызванных земным приливом.

Обнаружен береговой эффект тектонических деформаций, выраженный их изменением после бури в прилегающих к океану областях литосферы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-05-00026.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсуков О.М.* Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. 1991. № 12. С. 93–97.
- Бердичевский М.Н., Колдаев Д.С., Яковлев А.Г.* Магнитотеллурическое зондирование на берегу океана // Физика Земли. 1992. № 6. С. 87–96.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А.* Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 63–75.
- Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
- Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
- Мардерфельд Б.Е.* Береговой эффект в геомагнитных вариациях. М.: Наука, 1977. 80 с.
- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 454 с.
- Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.* Особенности регионального и локального береговых эффектов в магнитотеллурическом поле Камчатки // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 81–94.

- Родкин М.В., Рундквист Д.В.* Геофлюидогеодинамика. Долгопрудный: Издательский Дом “Интеллект”, 2017. 288 с.
- Рыков А.В.* К проблеме наблюдений колебаний Земли. Аппаратура, методы и результаты сейсмометрических наблюдений // Сейсмические приборы. Вып. 12. М.: Наука, 1979. С. 3–8.
- Соболев Г.А.* Возникновение берегового эффекта тектонических деформаций вследствие магнитной бури // Докл. АН. 2020. Т. 495. № 11. С. 47–51.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А.* Локальные тектонические деформации и близкие по месту и времени землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2020. № 3. С. 1–9.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П.* О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. 2001. № 11. С. 62–72.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Киреевкова С.М., Майбук З.-Ю.Я.* Экспериментальное исследование влияния постоянного электрического тока на фильтрацию суспензий в горной породе // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 19–33.
- Тарасов Н.Т.* Влияние солнечной активности на сейсмичность Земли // Инженерная физика. 2019. № 6. С. 23–33.
- Тренькин А.А.* Возможное влияние теллурических токов на сейсмичность земной коры в сейсмоактивных областях // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 1. С. 139–144.
- Adushkin V.V., Spivak A.A.* Problems Related to the Interaction of Geospheres and Physical Fields in Near-Surface Geophysics // *Izv., Phys. Solid Earth*. 2019. V. 55. P. 1–11.
- Hardle W.* Applied nonparametric regression. Cambridge, N.Y., New Rochell, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 1989 / Русский перевод: В. Хардле Прикладная непараметрическая регрессия. М.: Мир, 1993. 349 с.
- Jeffrey J.L., Jeremy N. Thomas.* Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes // *GRL*. 2013. V. 40. P. 1165–1170.
<https://doi.org/10.1002/grl.50211>
- Parkinson W.D.* The influence of continents and oceans on geomagnetic variations // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1962. V. 6. P. 441–449.
- Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Isaeva A.V. et al.* Fluid Initiation of Fracture in Dry and Water Saturated Rocks // *Izv., Phys. Solid Earth*. 2020. V. 56. P. 808–826.
- Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A.* Spatial and Temporal Structure of Global Low-Frequency Seismic Noise // *Izv., Phys. Solid Earth*. 2019. V. 55. P. 529–547.
- Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A., Migunov I.N. et al.* Effect of Magnetic Storms on Low-Frequency Seismic Noise // *Izv., Phys. Solid Earth*. 2020. V. 56. P. 291–315.
- Wenzel G.* Program PETGTAB. Version 3.01. Hannover: Universite, 1999.
- Wieland E., Streckeisen G.* The leaf-spring seismometer – design and performance // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1982. V. 72. P. 2349–2367.
- Yesugey S.C.* Comparative evaluation of the influencing effects of geomagnetic storms on earthquakes in the Anatolian Peninsula // *Earth Sci. Res. J.* 2009. V. 13. P. 82–89.

Influence of Magnetic Storm on Tectonic Deformations and Coast Effect

G. A. Sobolev*

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

*e-mail: sobolev@ifz.ru

The records from fifty-eight identical broadband seismic stations have been studied during the strong geomagnetic storms. Oscillations with the periods of several hours have been analyzed. They were compared with the synchronous readings of theoretical earth tides. Seismic stations located on the boundary continent–ocean demonstrated anomalous variations in the strain rate after the storm. The effect lasted for a few days, and its amplitude reached several millimeters per minute.

Keywords: seismic stations, tectonic deformations, magnetic storm, earth tide, coastal effect