

## ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ЧАСОВОМ ДИАПАЗОНЕ ПЕРИОДОВ

© 2021 г. Г. А. Соболев<sup>1,\*</sup>, Н. А. Закржевская<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 26.03.2021 г.

После доработки 18.04.2021 г.

Принята к публикации 18.04.2021 г.

Вычислены отклонения скорости вертикальных колебаний земной коры по данным широкополосной сейсмической станции от теоретических значений земных приливов. Они сопоставлены с информацией о погоде в месте расположения станции. Показано, что в интервалах времени одновременного появления низкого атмосферного давления и дождей возникают аномалии скорости деформаций, достигающие по величине половину суточных вариаций скорости земного прилива. Появление аномалий запаздывает от времени минимальных значений давления и сильных дождей на несколько часов, а длительность аномалий измеряется первыми сутками.

*Ключевые слова:* широкополосная сейсмическая станция, земные приливы, тектонические деформации, атмосферное давление, дожди.

**DOI:** 10.31857/S0002333721060090

### ВВЕДЕНИЕ

Из визуальных наблюдений и количественных данных известно, что между различными природными процессами существуют связи. Значительное количество научных работ посвящено влиянию солнечной активности на сейсмичность Земли [Барсуков, 1991; Гордеев, 1995; Адушкин, 2008; Сычева, 2011; Тарасов, 2019]. После сильнейших магнитных бурь с планетарными  $Kp$ -индексами больше 7 появляются сильные землетрясения с магнитудами больше 6.5 в разных районах Земли [Соболев, 2021a]. Недавно было выявлено, что магнитная буря вызывает также колебания земной поверхности продолжительностью в несколько суток. Примечательно, что амплитуда этих колебаний усиливается вблизи границы океан – материк, формируя “береговой эффект” тектонических деформаций [Соболев, 2021б]. Мало изучено влияние метеорологических условий на разные процессы в твердой Земле. Изменения погоды регистрируются на многих метеорологических станциях, размещенных во всех районах мира. На некоторых станциях атмосферное давление, скорость ветра и выпадение осадков записываются несколько раз в сутки и даже ежечасно. Казалось бы, вопросы взаимовлияния и взаимодействия метеорологических параметров с сейсмическими, электромагнитными процессами, а также с деформациями земной коры, должны быть глубоко изучены. Но это не так. Сказывает-

ся, по-видимому, отсутствие единой унифицированной системы метеорологических наблюдений в мире, которая существует, например, в сейсмологии.

В работе [Адушкин и др., 2008] обращалось внимание на связь барических изменений в атмосфере и микросейсмических процессов в земной коре. Ряд вопросов влияния вариаций погоды на сильные землетрясения и разнообразные геофизические поля был изучен А.А. Спиваком [Спивак, 2018; Спивак и др., 2020]. При сопоставлении сейсмического шума на широкополосных сейсмических станциях было показано, что сейсмический шум в минутном диапазоне периодов реагирует на локальные изменения в близко расположенных к станциям областях атмосферы [Sobolev, 2019].

Задача настоящей работы – сопоставить вариации вертикальных компонент теоретического земного прилива и вертикальных колебаний земной поверхности по данным широкополосной сейсмической станции. Мы выбрали для этой цели сейсмическую станцию на северо-западе Северной Америки. Там существует уникальная ситуация, когда сейсмическая станция COR [44.586 с. ш. – 123.303 в. д.] и метеостанция Corvallis [44.56 с. ш. – 123.28 в. д.] расположены практически в одном и том же месте с расстоянием между ними 3.4 км. Обычно, метеостанции с регулярными количественными измерениями погоды находятся при

аэропортах, где шум аэродрома мешает регистрации природных сейсмических сигналов.

Сейсмическая станция COR (Corvallis, Oregon, USA) расположена на пологом склоне. Сейсмометр STS-1 установлен на постаменте из армированного бетона, заглубленным на 3 м от земной поверхности. Под ним находятся граниты. Окружающие станцию горные породы представлены также базальтовой лавой, брекчиями, алевритами и песчаниками. Климат района мягкий, часто идет дождь. Среднегодовой уровень осадков изменяется от 250 до 2500 мм. Средняя температура меняется в январе от 2 до 10°C, в июле до 24°C.

## МЕТОДИКА

Полученные из Интернета<sup>1</sup> ежесекундные значения скорости вертикального смещения постаментов станции COR сопоставлялись с вариациями теоретически вычисленной скорости земного прилива. На рис. 1 график  $P$  показывает вариации высоты теоретического прилива (далее прилива) в точке координат станции COR в марте 2010 г. Вычисления сделаны с использованием программы PETGTAB [Wenzel, 1999] с дискретностью один отсчет в минуту. Размах колебаний достигает 400 мм. График  $dP$  демонстрирует скорость изменения прилива, полученную дифференцированием высоты прилива. Ее амплитуда колеблется в пределах 2.7 мм/мин. График  $dS$  представляет скорость вертикального смещения постаментов сейсмической станции COR. Исходная запись с дискретностью 1 отсчет в секунду усреднена до 10 с и очищена фильтром Гаусса [Hardle, 1989; Любушин, 2007] с радиусом 30 единиц (усреднение) от микросейсм секундного диапазона периодов. Далее, она приведена к минутным отсчетам, а ее чувствительность уменьшена в 1400 раз, чтобы проводить сопоставление вариаций  $dS$  и  $dP$  в одной и той же шкале ординат. Таким образом, значения  $dS$  на рисунках представлены в единицах мм/мин, соответствующих скорости изменения высоты прилива  $dP$  (рис. 1). Коэффициент корреляции значений  $dS$  и  $dP$  составляет 0.99. На графике  $dif$  приведена разность амплитуд  $dif = dS - dP$ ; ее размах составляет ~23% от изменений  $dP$  и  $dS$ . Прослеживаются квазипериодические колебания. Проведенный нами анализ величины и формы таких вариаций на разных широкополосных станциях привел к гипотетическому выводу, что эти колебания вызваны разной реакцией сейсмической станции на фазы растяжения и сжатия при земных приливах. Отличия диаграмм растяжения и сжатия твердых материалов хорошо известны [Малинин, 1975]. Амплитуда колебаний зависит от неупругих свойств горных пород в области расположения станции, что

не учитывается при расчете теоретического прилива. Расчетный и наблюдаемый прилив будут различаться и для чисто упругой среды, но с неточно подобранными (в теоретической модели) модулями упругости.

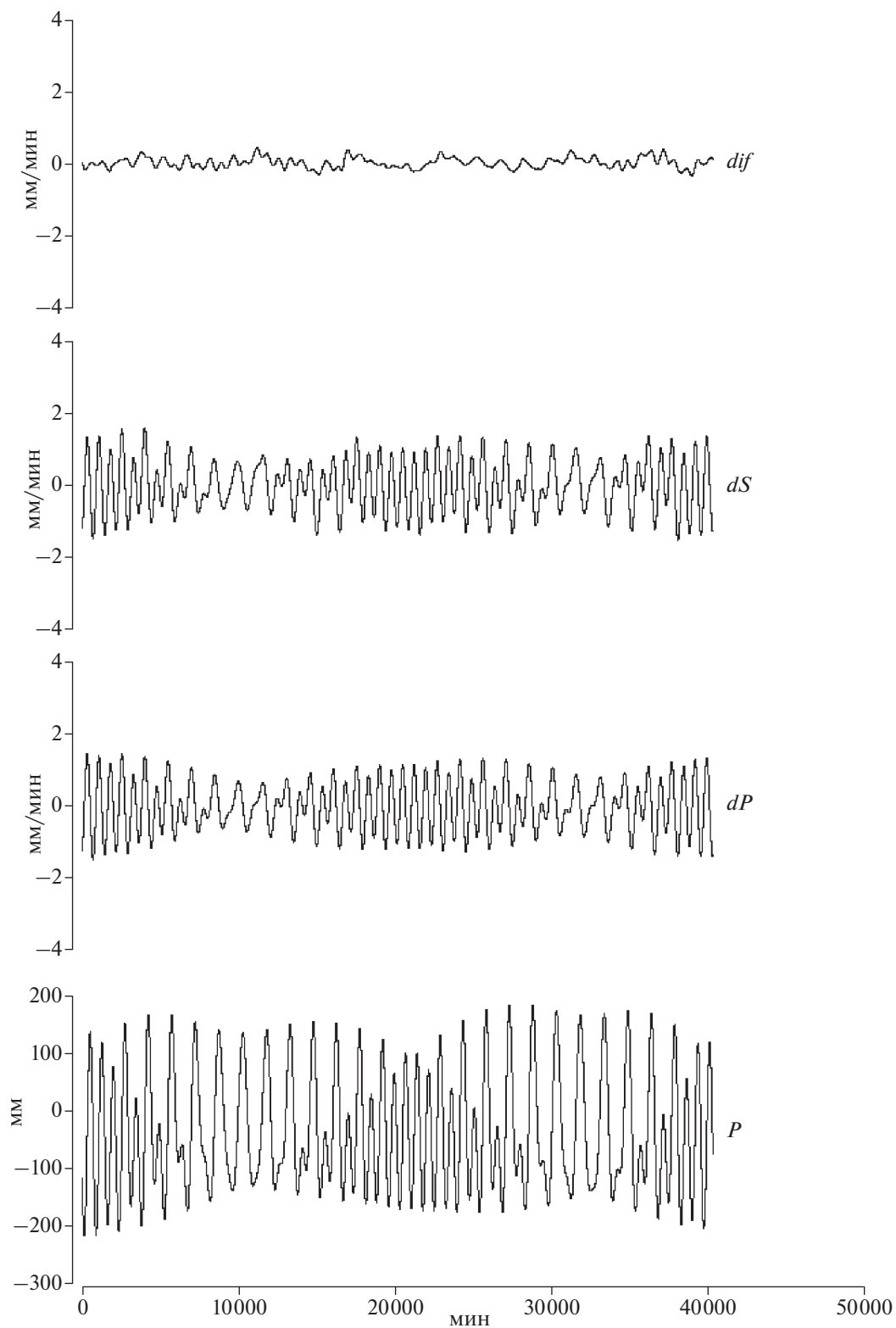
Максимальная и одинаковая чувствительность широкополосных станций системы IRIS, оснащенных сейсмометром STS-1, покрывает диапазон от 0.2 до 360 с [Wieland, Streckeisen, 1982]. Далее, она уменьшается в сторону более длительных периодов в 100 раз на декаду. Этого достаточно, чтобы уверенно регистрировать скорость колебаний земных приливов с периодами 12 и 24 ч, при которых вертикальные перемещения земной поверхности достигают 400 мм [Мельхиор, 1968], а скорости изменения составляют  $\approx 2$  мм/мин. Считается [Рыков, 1979], что на периодах  $>10^3$  с постепенно увеличивается эффект влияния силы тяжести на пружину вертикального маятника. Соответствующая калибровка с учетом гравитации, по-видимому, не проводилась и не опубликована.

В настоящей работе основное внимание поиску влияния погоды на тектоническую деформацию уделялось полосе суточных и полусуточных колебаний. Было проверено, меняется ли чувствительность станции в этом диапазоне. Для этого были выполнены вычисления спектров мощности скоростей изменения прилива  $dP$  и смещений  $dS$ . Применялась программа А.А. Любушина (SCAN, Wavelet Packet Decomposition). Графики на рис. 2 и рис. 3 представляют колебания в полосах периодов 8.5–17 ч и 17–34 ч. Ошибки  $dS$  относительно прилива  $dP$  составляют одну и ту же величину (~20%) в обоих диапазонах 12 и 24 ч, что свидетельствует о практически постоянной амплитудно-частотной характеристике сейсмического канала при изучении суточных и полусуточных колебаний. Это означает, что записи сейсмической станции пригодны для сопоставления с приливом во всем этом диапазоне. Вторая особенность состоит в том, что ошибка в  $dif$  практически не зависит от амплитуды приливных колебаний. Это позволяет искать отличия сейсмических записей от метеорологических параметров независимо от формы и величины прилива.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Были получены записи станции COR за период с 2010 по 2016 гг. Исследовались только те интервалы, когда не было пропуска ежесекундных данных  $dS$ . Изучение результатов часовых значений атмосферного давления, выпадения дождя и скорости ветра на станции Corvallis показало, что иногда отмечались значительные одновременные вариации этих метеорологических параметров.

<sup>1</sup> <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/forms/breqfast-request>



**Рис. 1.** Вариации земного прилива  $P$ , скорости его изменения  $dP$ , скорости смещения  $dS$  и разности  $dif = dS - dP$  на сейсмической станции COR.

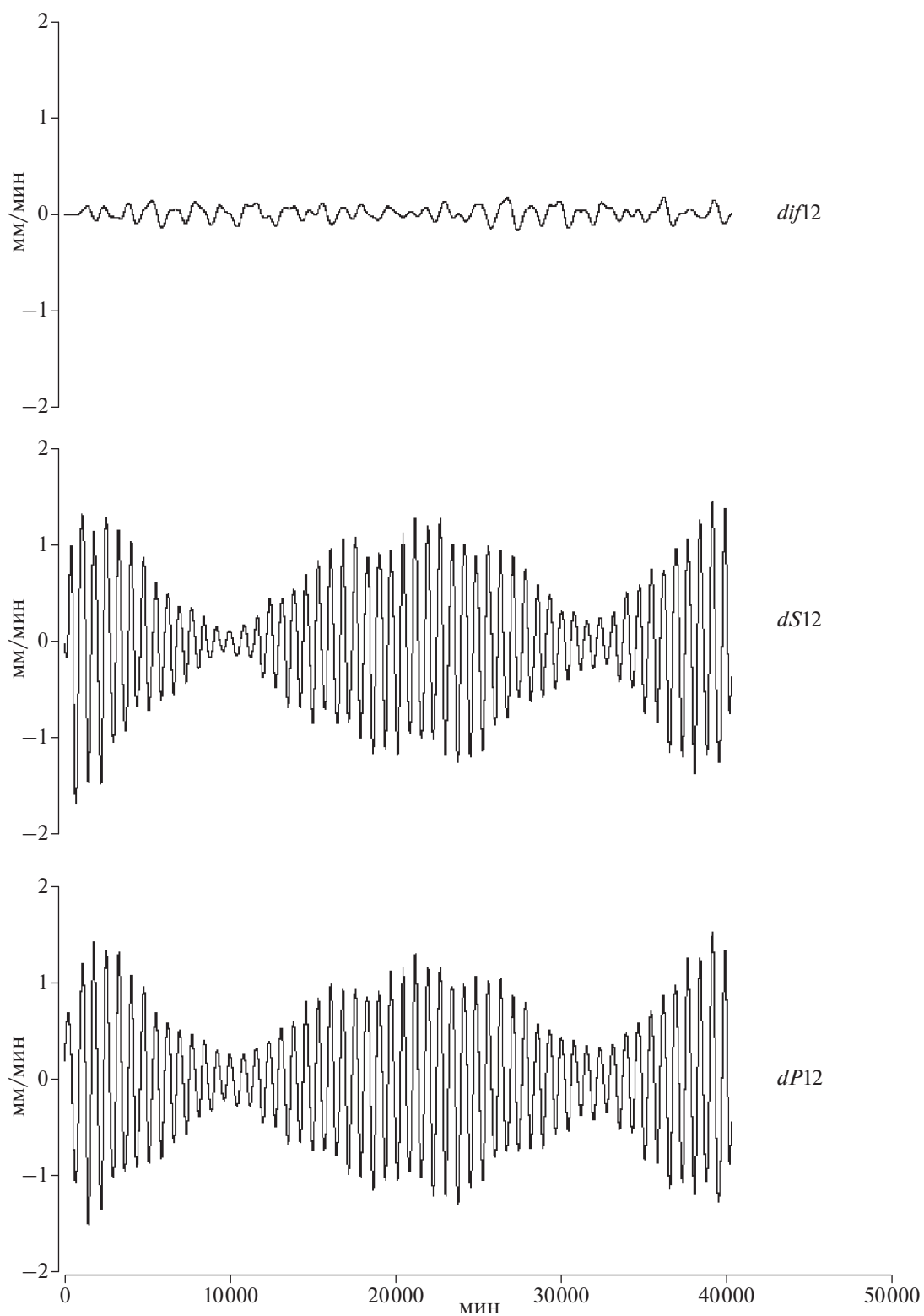


Рис. 2. Значения скорости прилива  $dP12$  и скорости смещения  $dS12$  в полосе периодов 8.5–17 ( $\approx 12$  ч);  $dif12 = dS12 - dP12$ .

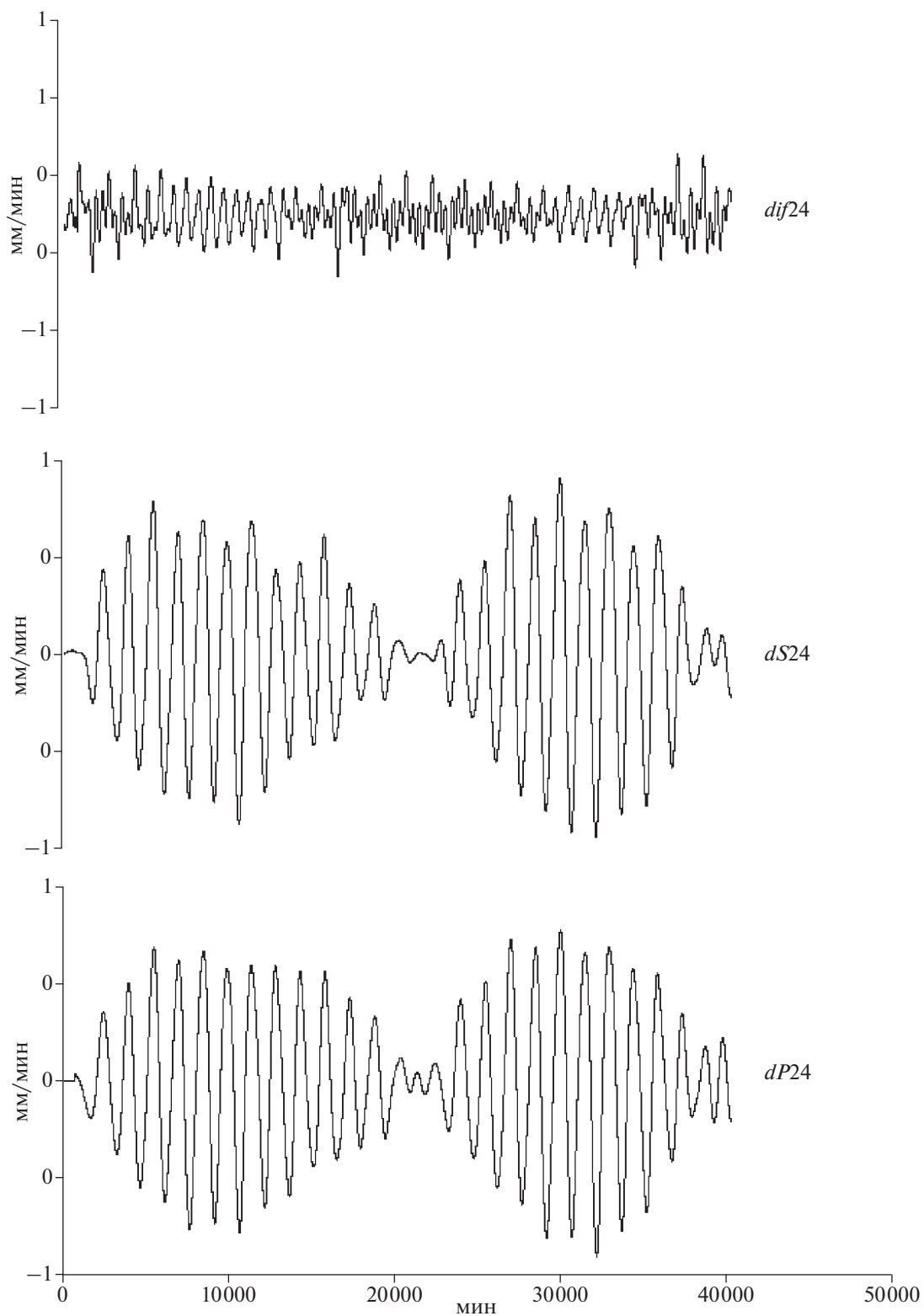


Рис. 3. Значения скорости прилива  $dP24$  и скорости смещения  $dS24$  в полосе периодов 17–34 ( $\approx 24$  ч);  $dif24 = dS24 - dP24$ .

На рис. 4 представлены результаты сопоставления в интервале с 01 по 31.11.2012 г. величины  $dif = dS - dP$  сейсмической станции COR с данными метеостанции Corvallis. На оси абсцисс в отличие от рис. 1 – рис. 3 показаны значения в часах, так как с такой дискретностью приведены полученные по системе ИНТЕРНЕТ<sup>2</sup> метеоданные атмосферного давления (а), выпадения осадков (б) и скорости ветра (в). 19 ноября (460 ч) проявляются повышенные относительно предыдущего фона колебания  $dif$ . Их амплитуда составляет 1.7 мм/мин, что составляет примерно половину скорости изменения прилива для данной станции (см. график  $dP$ , рис 1). На графиках приведены вариации атмосферного давления (а), выпадения осадков (б) и скорости ветра (в). Аномалия  $dif$  возникла в интервале низкого давления 997 ГПа при среднем уровне в этом месяце 1009 ГПа. Она сопровождалась сильным дождем с высотой слоя осадков 20 мм и усилением ветра. Длительность аномалии составила примерно 15 ч.

В марте 2013 г. (рис. 5) были 2 интервала падения атмосферного давления до 995 ГПа (100 и 650 ч) при среднемесечном уровне 1013 ГПа. В обоих случаях они сопровождалась дождями величиной до 2.3 и 7.4 мм и длительностью в одни сутки. Минимумы давления совпадали по времени с серединами дождевых серий. Аномальное повышение  $dif$  отмечено в конце серий дождей на фоне повышения давления после минимумов. Усиление ветра произошло только во втором случае.

В апреле 2011 г. аномалия с амплитудой 1.8 мм/мин возникла через 6 ч после минимума атмосферного давления до 998 ГПа при среднемесечном уровне 1012 ГПа (рис. 6). Минимум пришелся на середину серии дождей с мощностью слоя осадков до 3.7 мм. Особенностью записи была смена преобладающего периода колебаний от 24 до 12 ч после аномалии. Анализ показал, что это связано со сменой формы земного прилива за счет большего или меньшего вклада 12 и 24 часовых колебаний; это продемонстрировано на графике скорости прилива  $dP$ . Импульсная форма аномалии отличается от приливных колебаний, что делает более вероятным ее происхождение за счет погодных условий.

В некоторых случаях при небольших амплитудах  $dif$  не удавалось точно определить начало и развитие аномалии. Тогда мы применяли программу вычисления когерентности А.А. Любушина *WBRCM.exe*, любезно предоставленную автором [Любушин, 2007]. Под когерентностью в физике понимается согласованность нескольких колебательных процессов во времени. Мы предполагали, что в нашем случае мера когерентности будет иметь высокие значения при сопоставле-

нии сдвинутых во времени участков записи  $dif$ , если процесс описывается повторяющимися колебаниями вследствие земного прилива. Влияние дополнительных источников метеорологической природы (атмосферное давление, выпадение осадков и усиление ветра) могло уменьшать когерентность.

Применялась следующая схема вычислений. В записи  $dif$  выделялись 3 последовательных интервала, сдвинутых во времени на 1 сут (1440 мин), и вычислялась мера когерентности при их совместном анализе в движущемся окне длиной 4320 мин со сдвигом 1 мин. Конечно, продолжительность суточных колебаний земных приливов варьировала, но в среднем колебалась вокруг значения 1440 мин. Выбор сравниваемых выборок именно этой длительности показал наибольшую устойчивость вычисления меры когерентности.

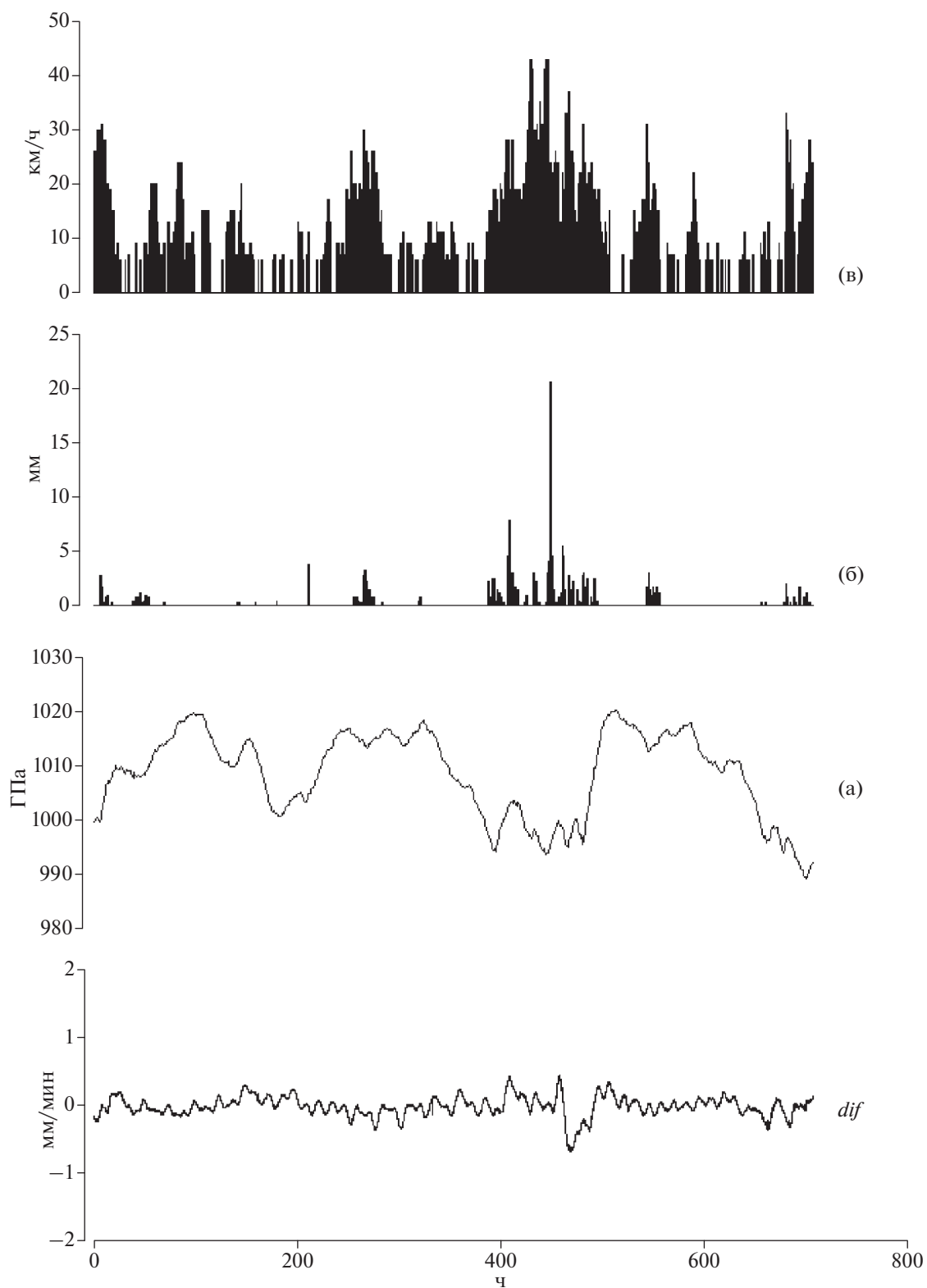
Робастная вейвлетная мера когерентности  $k(\tau, \beta)$ , описывается в программе Любушина *WBRCM* формулой:

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

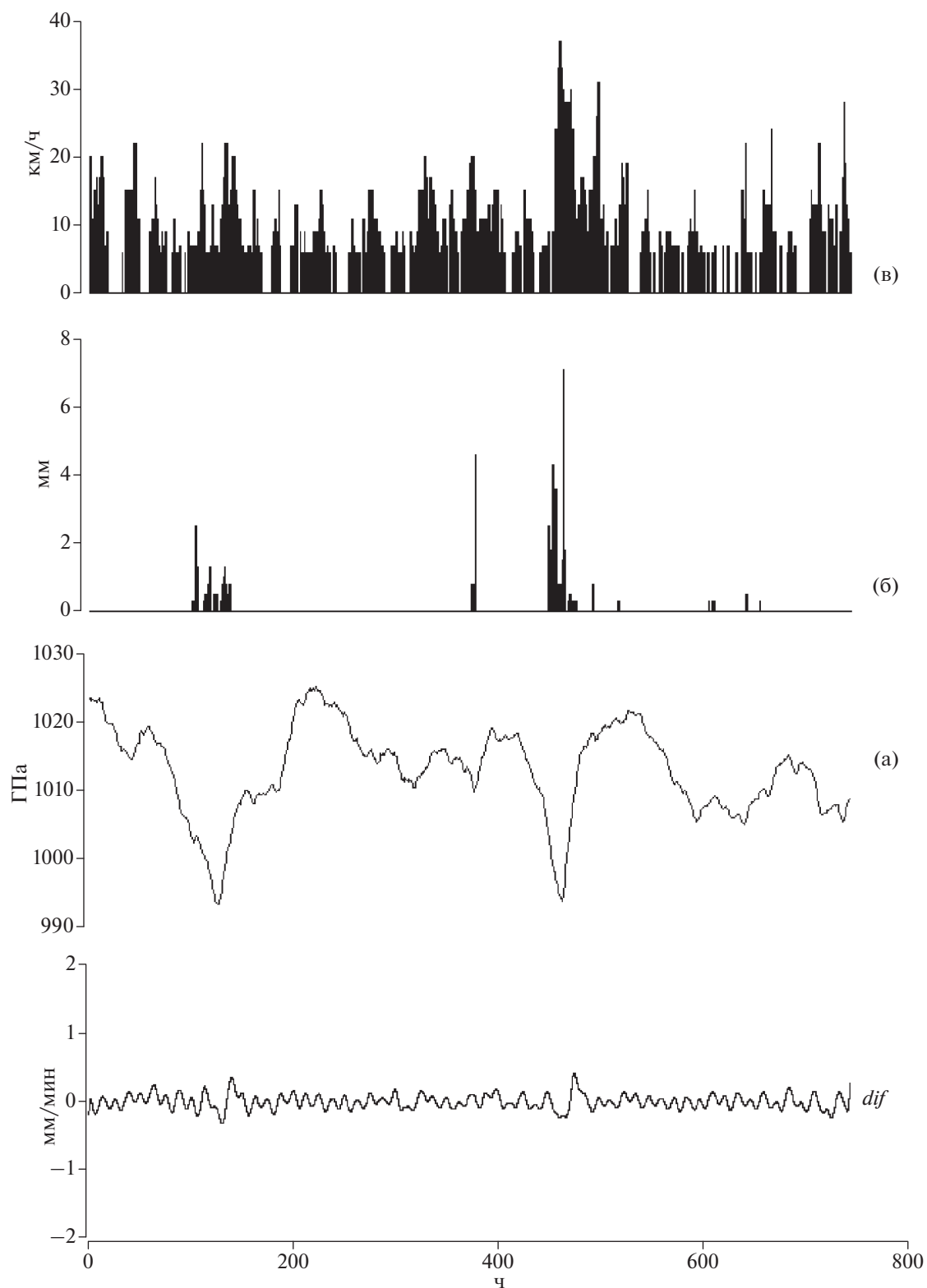
где:  $v_k(\tau, \beta)$  – коэффициент, описывающий силу связанности процесса с номером  $k$  с другими;  $\tau$  – временная координата правого конца скользящего временного окна;  $\beta$  – уровень детальности вычисления коэффициентов  $c_j^{(\beta, \tau)}(k)$  дискретного ортогонального вейвлет-преобразования. 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  $\beta$ , 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. Наибольший интерес представляют не абсолютные значения, а относительные величины для различных  $\tau$ . В ниже представленном результате число вейвлет-коэффициентов было выбрано  $L_{\min} = 14$  и вычислялись вейвлеты HAAR Sym02. Эта методика применялась нами в работе [Соболев, 2021б] и показала высокую эффективность. Количественные результаты вычислений  $k(\tau, \beta)$  обозначим знаком **ког** (когерентность).

Приведем на рис. 7 пример сентября 2015 г., когда трудно было выделить начало и длительность аномалии  $dif$  в интервалах пониженного атмосферного давления и выпадения осадков. Минимум вычисленного графика **ког** указывает время наибольшего отклонения меры когерентности от квазипериодического процесса, что вызвано аномалией скорости смещения. Стрелка обозна-

<sup>2</sup> <https://www.wunderground.com>

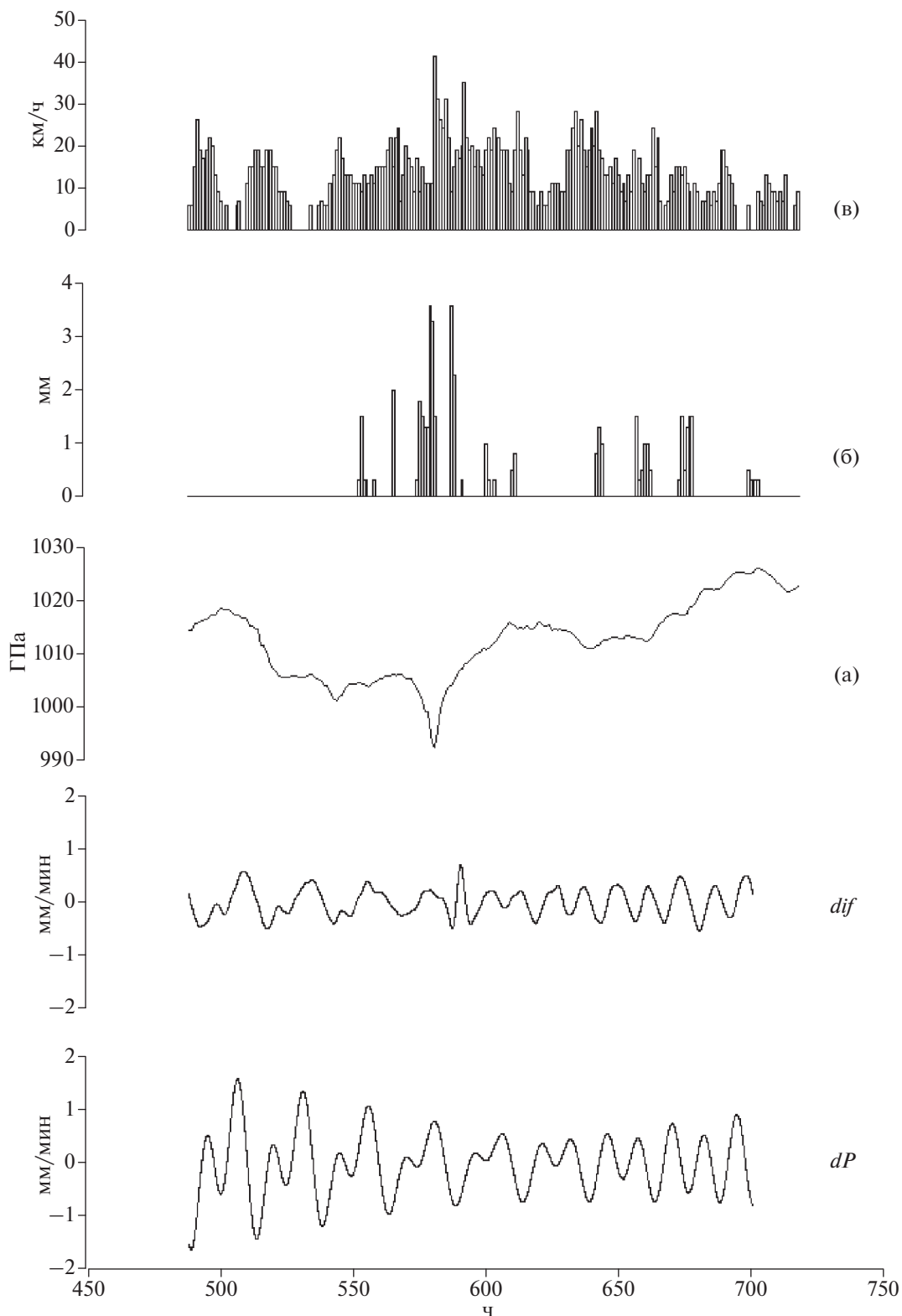


**Рис. 4.** Отклонение скорости смещения  $dS$  от скорости прилива  $dif$  во время пониженного атмосферного давления (а), выпадения дождей (б) и усиления ветра (в). Часы отсчитаны от начала месяца.



**Рис. 5.** Отклонения скорости смещения  $dS$  от скорости прилива  $dif$  в интервалах пониженного атмосферного давления (а) и, выпадения дождей (б); усиление ветра (в) отмечалось лишь в интервале 460–480 ч. Часы отсчитаны от начала месяца.





**Рис. 6.** Отклонения скорости смещения  $dS$  от скорости прилива  $dif$  в интервалах пониженного атмосферного давления (а), выпадения дождей (б) и усиления ветра (в). График  $dP$  демонстрирует структуру скорости прилива. Часы отсчитаны от начала месяца.

**Таблица 1.** Количественные характеристики отклонения *dif* по сейсмологическим данным от скорости прилива

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.2010	260	0.3	225	5	240	989	35	20
04.2011	584	1.7	583	4	581	998	1	3
09.2011	580	0.3	580	3	570	997	0	10
11.2012	460	1.7	380	2	445	997	80	15
01.2013	205	1.1	200	1	200	1003	5	5
03.2013	466	0.7	448	7	465	987	18	1
09.2013	673	0.7	667	17	666	994	6	7
01.2014	250	1.7	245	4	250	1000	5	0
01.2015	410	1	385	2	410	1000	25	0
02.2015	648	0.5	605	2	640	998	43	8
08.2015	715	0.5	675	6	674	995	40	36
09.2015	353	0.3	347	13	352	1002	6	1
02.2017	380	1.4	370	14	370	985	10	10

Примечания: Номера колонок означают: 1 – месяц и год появления аномалии; 2 – начало аномалии *dif*, часы; 3 – амплитуда *dif*, мм/мин; 4 – начало дождя, часы; 5 – количество выпавших осадков в месте расположения метеостанции, представленное толщиной слоя осадков – мм; 6 – время минимума атмосферного давления, часы; 7 – амплитуда атмосферного давления, ГПа; 8 – разница во времени между началом аномалии *dif* и началом дождя, часы; 9 – разница во времени между началом аномалии *dif* и минимумом атмосферного давления, часы.

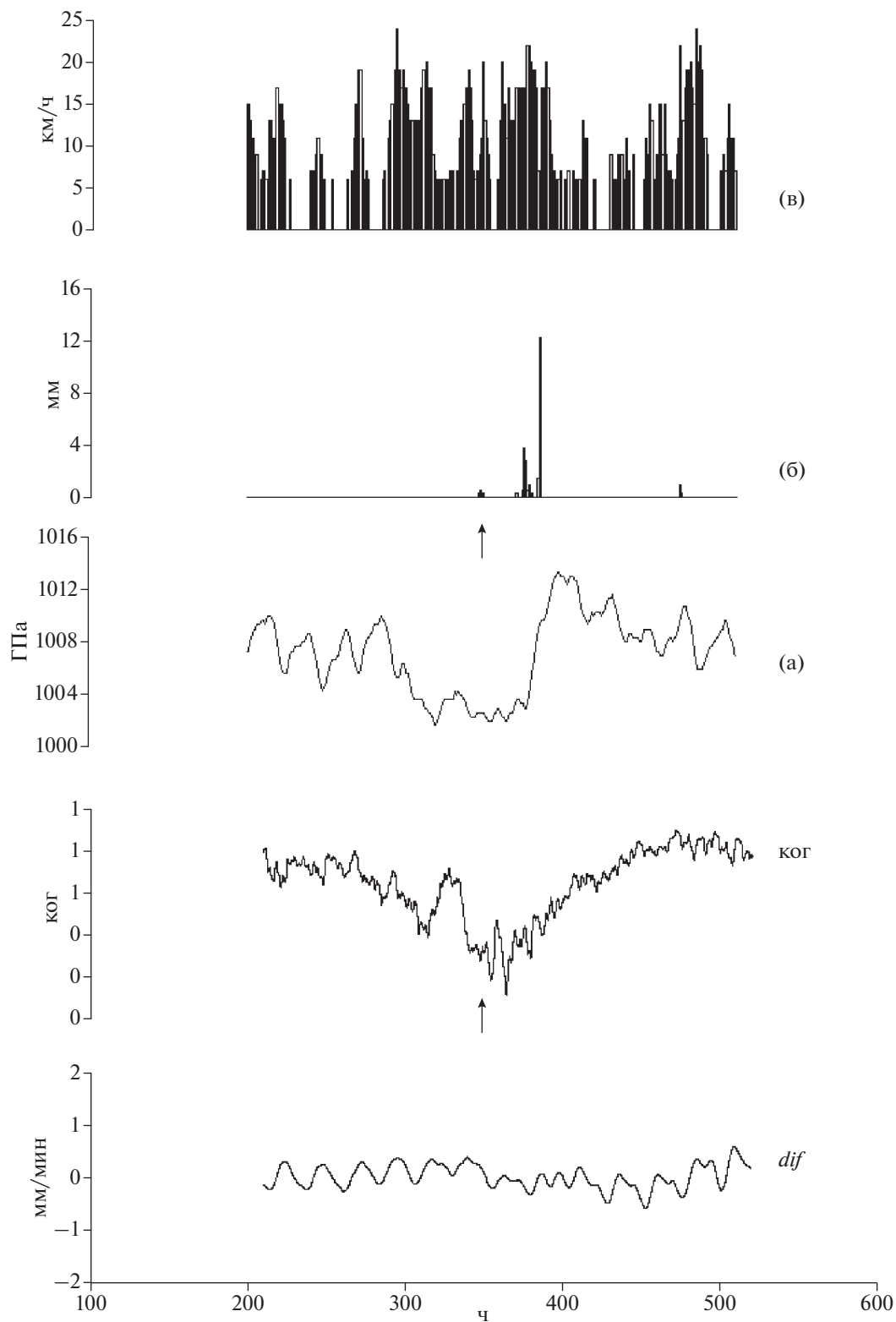
чает время относительно небольшого дождя (0.5 мм) в серии осадков. Результаты вычисления **ког** при пошаговом сдвиге движущегося окна в 1 мин привели к выводу, что начало аномалии запаздывало относительно начала дождя на 6 часов, а наибольшее отклонение *dif* от значений скорости прилива  $dP$  составило 17 ч.

Аномалии скорости смещения возникали при низком атмосферном давлении, сопровождаемом дождем. В то же время, при высоком давлении даже существенное количество осадков ( $\geq 2$  мм) не вызывало изменения скорости смещения. Пример продемонстрирован на рис. 8. Там 5-го (113 ч) и 28-го (667 ч) сентября 2013 г. прошли дожди с амплитудой осадков 20 и 17 мм при уровне атмосферного давления 1009 и 994 ГПа, соответственно. Аномалия скорости смещения *dif* возникла только во 2-ом случае. В данном примере амплитуда *dif* была повышенной в интервале 220–390 ч. Выяснилось, что это было связано с изменением структуры прилива, как объяснялось выше на примере рис. 6. В ниже приведенной таблице перечислены некоторые количественные характеристики выявленных в настоящей работе аномалий *dif*.

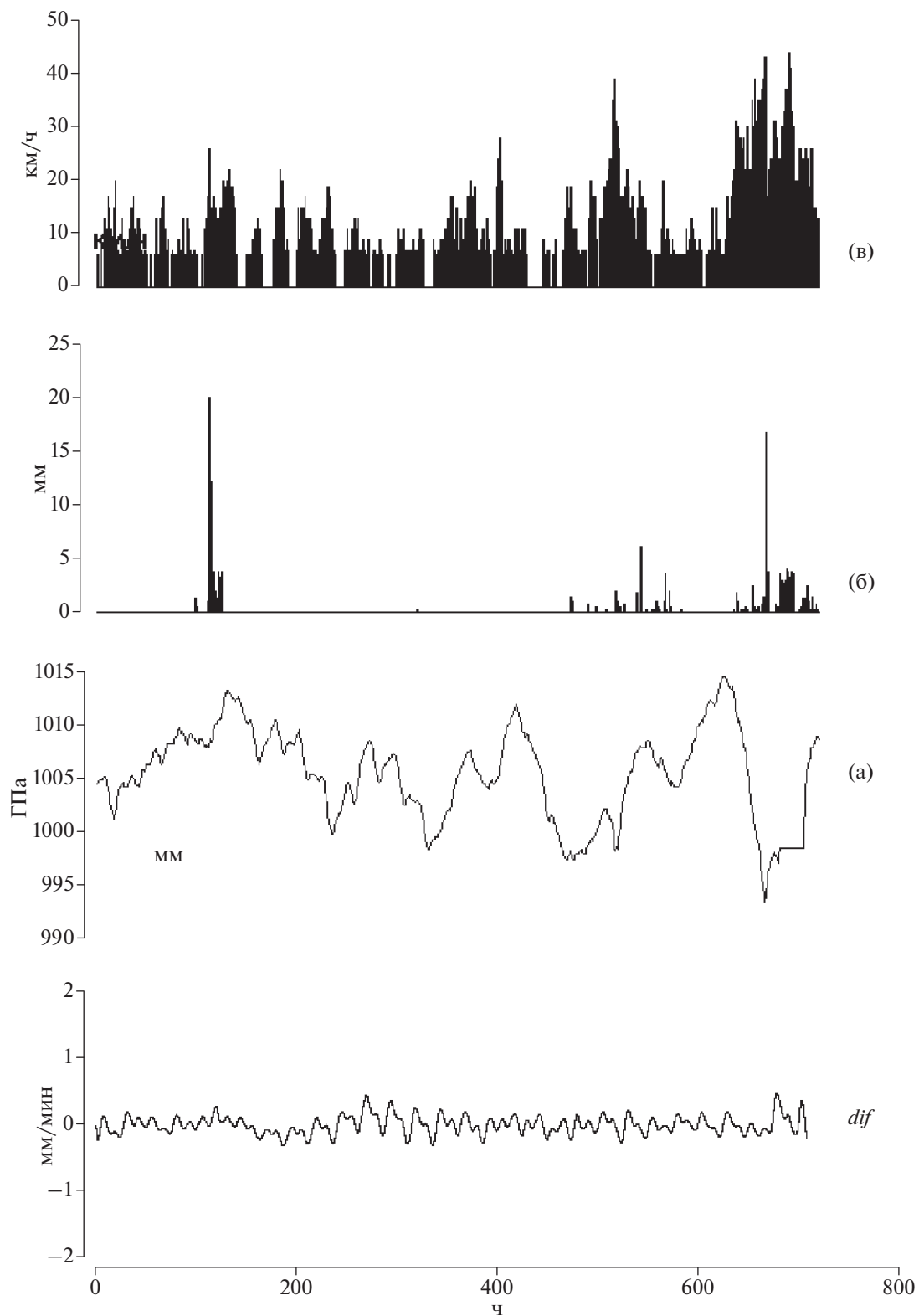
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных в таблице случаев сопоставления скоростей смещения по сейсмологическим данным и скоростей прилива вытекают следующие основные выводы. 1). Аномалии *dif* возникали одновременно или после минимумов атмосферного давления и выпадения дождя (колонки 8 и 9 в табл. 1). Различиям времени запаздывания аномалии в разных случаях не следует придавать большого значения. Мы не имеем сведений о расстоянии центра выпавших осадков до сейсмостанции, что скажется на времени задержки аномалии. Из многочисленных работ в области гидрогеологии известно, что скорость фильтрации воды (метры за сутки) различается для разных горных пород на несколько порядков. Детальные исследования продвижения фронта порового давления при течении воды в области водоохранилищ Койна–Варна [Смирнов, 2017] продемонстрировали большой разброс вследствие разной проницаемости горных пород и наличия разломов. В условиях разнообразия пород вокруг сейсмостанции COR (см. ВВЕДЕНИЕ) разное запаздывание аномалий *dif* после дождей вполне допустимо. 2). Аномалии *dif* проявлялись только в тех случаях, когда дожди происходили при низких атмосферных давлениях  $\leq 1003$  ГПа. 3). Не удалось выявить влияние на возникновение аномалий *dif* силы ветра. Он возрастал, как правило, при низком в районе станции давлении, что соответствовало хорошо известному факту движения облаков из соседних областей. Отсутствие реакции *dif* на ветер, возможно, связано с тем, что мы вычисляли вертикальное смещение земной поверхности. Попытки выделить аномалии на горизонтальных компонентах С-Ю и В-З были безуспешными вследствие большой зашумленности записей. Не обнаружены также изменения во время аномалий *dif* температуры воздуха в месте расположения станции. Отклонения от фоновых вариаций не превышали 1°C при ежесуточных вариациях порядка 7°–9°.

Вопросам динамики локальных деформаций большое внимание уделялось в исследованиях Ю.О. Кузьмина [Кузьмин, 2019a]. Детально и в различных регионах изучались деформации, в том числе, в разломных зонах. В частности, в работе [Кузьмин, 2019b] показано, что высокий уровень относительных деформаций в них, на 2 порядка превышающий деформации при земных приливах, не может быть объяснен линейными эффектами изменения жесткости горных пород, в том числе при выпадении осадков [Кузьмин, Жуков, 2004]. Была предложена модель параметрически возбудимой активной среды, когда малые воздействия различной природы выводят из состояния равновесия глобальные и региональные силы, создавая эффект нелинейного усиления колебаний.



**Рис. 7.** Отклонения скорости смещения  $dS$  от скорости прилива  $dif$  в интервалах пониженного атмосферного давления (а) и выпадения дождей. График ког показывает вариации меры когерентности 3-х последовательных суточных выборок  $dif$ . Стрелки отмечают время первого дождя. Часы отсчитаны от начала месяца.



**Рис. 8.** Вариации *dif* в интервалах высокого (120 ч) и низкого (660 ч) атмосферного давления (а) при одновременном выпадении дождей высотой слоя 20 и 17 мм. Аномалия *dif* возникла при низком давлении. Часы отсчитаны от начала месяца.

Главное отличие исследований Ю.О. Кузьмина от настоящей работы состоит, по-видимому, в том, что там изучались деформации суточных и более длительных периодов. Это связано с тем, что экспериментальные данные были получены, в основном, на геодезических полигонах (наклономеры, нивелиры, GPS) с дискретностью наблюдений часы, сутки, месяцы, годы. Мы же использовали здесь результаты сейсмических наблюдений с дискретностью 1 отсчет в секунду. Это позволяло изучать динамику колебаний в часовом и суточном диапазонах периодов.

У нас нет оснований отметить существенную роль разломов при формировании аномалий скорости смещения. Расположение разлома под сейсмической станцией COR маловероятно. Во-первых, он не упомянут в описании станции. Во-вторых, обычным и важным требованием установки сейсмических станций является залегание под ними неразрушенных массивов скальных пород, чтобы избежать искажений структуры сейсмических лучей. Это позволяет предположить, что в рамках общей модели параметрически возбудимой активной среды Ю.О. Кузьмина на результаты описанных в настоящей статье исследований влияют разные физические механизмы.

Один из них был предложен для объяснения нелинейного отклика среды на внедрение воды в лабораторных условиях [Соболев и др., 2006]. Там в механически нагруженную модель добавлялась вода в количестве 0.1% от объема модели. Это привело к нелинейному росту акустической эмиссии. Экспоненциально возрастало количество трещин, местоположение которых было определено с помощью локации акустических сигналов. Результаты объяснялись уменьшением прочности модели в результате адсорбции, хемосорбции, смачивания и других физико-химических взаимодействий вследствие эффекта Ребиндера [Ребиндер, Щукин, 1972; Корнев, 2003]. Он вызван уменьшением свободной поверхностной энергии на границе жидкого и твердого тела. Этот нелинейный эффект проявляется в горных породах, содержащих  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $MnO$ ,  $FeO$ . Их наличие, практически, несомненно в широком наборе пород вокруг станции COR (см. ВВЕДЕНИЕ). Если этот механизм действует, то следствием будет изменение жесткости пород, влияющее на приливные колебания.

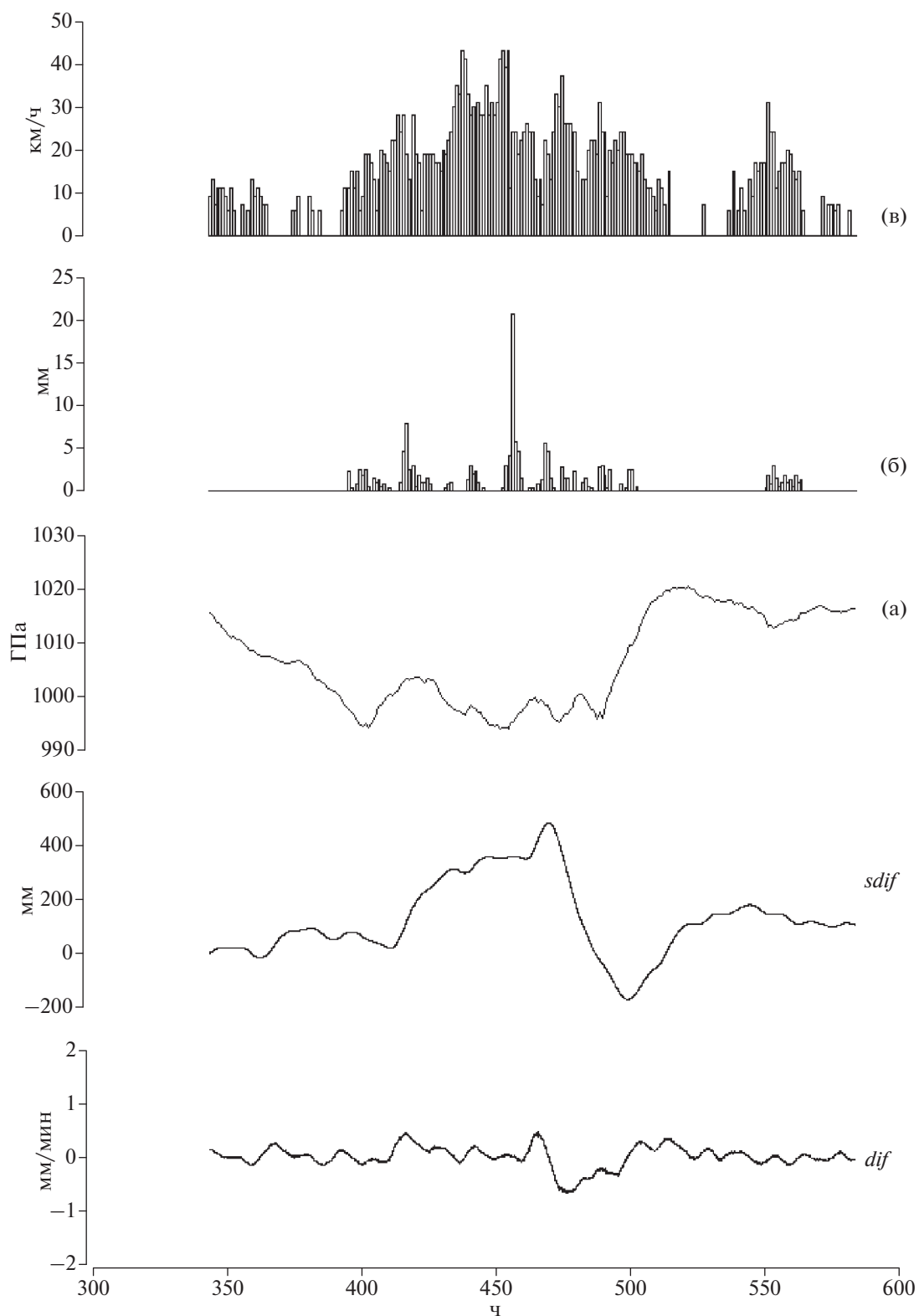
Последовательность возникновения аномалий скорости смещения прокомментируем на примере рис. 9. В интервале 340–400 ч (14.11–17.11.2012 г.) происходило постепенное падение атмосферного давления (а) от 1017 до 995 ГПа. Затем пошла дожди (график В), наиболее мощный из которых с толщиной водного слоя 20 мм случился 19 ноября (456 ч). В этом интервале амплитуда колебаний *dif* несколько увеличилась, но

наиболее примечательной особенностью было возрастание графика *sdif*. Он вычислен суммированием значений *dif* с шагом 1 мин, т.е. представляет отклонения сейсмологических данных от уровня теоретического прилива в единицах смещения. Отклонение кривой *sdif* от 0 составило  $\approx 400$  мм, т.е. соответствовало максимальным колебаниям земного прилива на данной станции (см. рис.1). В интервале постепенного роста *sdif* (416–462 ч) атмосферное давление (а) менялось мало. Это позволяет предположить, что главную роль играло выпадение дождя и причина состоит в намокании пород. Аномалия скорости смещения *dif* появилась через 5 ч после мощного дождя и продолжалась около 30 ч.

Гипотетическая схема физики происхождения аномалий скорости смещения под влиянием метеорологических условий состоит в следующем. Динамические процессы в атмосфере формируют иногда область низкого давления в месте расположения станции COR. Это вызывает восходящие движения поверхности земли, изменяет структуру порового пространства и увеличивает проницаемость верхнего слоя горных пород. Приход облаков из соседних районов вызывает дождь. Проникновение воды в пористое пространство и смачивание широкого спектра минералов вызывает вышеупомянутый эффект Ребиндера. Следствием является рост новых трещин и скорости смещения. Не интенсивность понижения атмосферного давления и величина осадков определяют амплитуду аномальных колебаний *dif*. Например, толщина слоя выпавших осадков в анализированных нами случаях составляла примерно 10мм, в то время как суммарная амплитуда накопления отсчетов *dif* достигала 400 мм (рис. 9). Совместное воздействие атмосферного давления и дождя играло роль триггера, высвобождающего накопленную в Земле упругую энергию.

Естественно, на описываемый процесс могут влиять и другие физические механизмы. Теоретически рассчитанный прилив может отличаться от истинного. В работе [Молоденский М.С., Молоденский Д.С., 2012] показано, что один из механизмов связан с вариациями тектонических напряжений вблизи очагов катастрофических землетрясений с магнитудами  $M > 8$ . Он не подходит к нашему случаю. Ближайшие землетрясения с  $5 < M < 6$  происходили на расстоянии свыше 300 км от станции COR [USGS, Significant Earthquakes Archive].

Влияние воды на изменение свойств горных пород исследовалось неоднократно [Bettinelli et al., 2008; Panda et al., 2018; Farquharson, Amelung, 2020]. Подчеркнем одну особенность выделенного нами эффекта. Возникновение аномальных смещений земной поверхности наблюдалось только в случаях одновременного проявления до-



**Рис. 9.** Аномалия *dif* в интервалах низкого атмосферного давления (а) при одновременном выпадении дождей с высотой слоя до 20 мм в. Накопление последовательных значений *dif* показано на графике *sdif*. Часы отсчитаны от начала месяца.

ждя и низкого атмосферного давления. Выпадение дождя при высоком давлении такого эффекта не вызывало. Таким образом, кроме смачивания дождем нужно еще увеличение открытой пористости горных пород, что обеспечивается понижением атмосферного давления. В таких условиях небольшого возмущения состояния горной породы вследствие эффекта Ребиндера, видимо, достаточно для триггерного возбуждения регистрируемых сейсмостанцией изменений скорости смещения поверхности земли относительно прилива.

## ВЫВОДЫ

- Обнаружены изменения в скорости смещения земной поверхности относительно скорости прилива при выпадении дождя в условиях низкого атмосферного давления.
- Амплитуда этих изменений достигала 50% от амплитуды суточных вариаций скорости прилива.
- Длительность изменений составляла 1–2 сут.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А.* Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре // *Физика Земли*. 2008. № 6. С. 77–85.
- Барсуков О.М.* Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // *Физика Земли*. 1991. № 12. С. 93–97.
- Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* К вопросу о связи высокочастотного сейсмического шума с лунно-солнечными приливами // *Докл. РАН*. 1995. Т. 340. № 3. С. 386–388.
- Корнев В.М.* Количественное описание эффекта Ребиндера (хрупкие и квазихрупкие тела): от замедления разрушения до самопроизвольного диспергирования // *Физическая мезомеханика*. 2003. Т. 6. № 3. С. 9–18.
- Кузьмин Ю.О., Жуков В.С.* Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: изд-во МГГУ. 2004. 264 с.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов // *Физика Земли*. 2019а. № 1. С. 78–103.
- Кузьмин Ю.О.* Индуцированные деформации разломных зон // *Физика Земли*. 2019б. № 5. С. 61–75.
- Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука. 2007. 228 с.
- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир. 1968. 454 с.
- Молоденский М.С., Молоденский Д.С.* О временных изменениях приливного отклика среды в окрестностях очагов катастрофических землетрясений // *Физика Земли*. 2012. № 11. С. 54–68.
- Ребиндер П.А., Шукин Е.Д.* Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // *Успехи физ. наук*. 1972. Т. 108. С. 3–42.
- Рыков А.В.* К проблеме наблюдений колебаний Земли. Аппаратура, методы и результаты сейсмометрических наблюдений. М.: Наука. Сб. Сейсмические приборы. 1979. Вып. 12. С. 3–8.
- 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., Пономарев А.В., Кольцов А.В. и др.* Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // *Геология и геофизика*. 2006. Т. 47. № 5. С. 608–621.
- Соболев Г.А.* Влияние больших магнитных бурь на возникновение больших землетрясений // *Физика Земли*. 2021а. № 1. С. 1–17.
- Соболев Г.А.* Воздействие магнитной бури на тектонические деформации и береговой эффект // *Вулканология и сейсмология*. 2021б. № 2. С. 11–28.
- 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.
- Спивак А.А., Шалимов С.Л., Рябова С.А., Харламов В.А.* Об атмосферных проявлениях сильных землетрясений // *Физика Земли*. 2020. № 4. С. 51–60.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н.* О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // *Физика Земли*. 2011. № 3. С. 55–71.
- Тарасов Н.Т.* Влияние солнечной активности на сейсмичность Земли // *Инженерная физика*. 2019. № 6. С. 23–33.
- Bettinelli P., Avouac J.-P., Flouzat M., Bollinger L., Ramillien G., Rajaure S., Sapkota S.* Seasonal variations of seismicity and geodetic strain in the Himalaya induced by surface hydrology // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. V. 266. P. 332–344.
- Farquharson J.I., Amelung F.* Extreme rainfall triggered the 2018 rift eruption at Kilauea Volcano // *Nature*. 2020. V. 580. P. 491–495.
- 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.)
- Panda D., Kundu B., Gahalaut V.K., Bürgmann R., Jha B., Asaithambi R., Yadav R.K., Vissa N.K., Bansal A.K.* Seasonal modulation of deep slow-slip and earthquakes on the Main Himalayan Thrust // *Nature communications*. 2018. V. 9. P. 4140.
- Sobolev G.A., Sobolev D.G., Migunov I.N., Zakrzhevskaya N.A.* Some Properties of Low Frequency Seismic Noise // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2014. V. 50. № 4. P. 474–483.
- 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.

## Effect of Meteorological Conditions on the Tectonic Deformations in the Hourly Range of Periods

G. A. Sobolev<sup>a,\*</sup>, N. A. Zakrzhevskaya<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*

Deviations of vertical velocities of crustal movements measured by a broadband seismic station from the velocities of the Earth's tides predicted by theory are calculated. The obtained deviations are compared with weather data at station site. It is shown that during the intervals of simultaneous occurrences of low atmospheric pressure and rainfalls, strain anomalies emerge reaching half of the diurnal variations of tidal velocities. The anomalies appear a few hours after the time of the minimum pressure and heavy rains and their duration is a few days.

*Keywords:* broadband seismic station, Earth's tides, tectonic deformations, atmospheric pressure, rainfall