

УДК 550.334

ПРИМЕРЫ СОВМЕСТНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЧАСОВОМ ДИАПАЗОНЕ ПЕРИОДОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2020 г. Член-корреспондент РАН Г. А. Соболев*

Поступило 10.12.2019 г.
После доработки 10.12.2019 г.
Принято к публикации 10.12.2019 г.

Изучены записи широкополосной сейсмической станции ААК, расположенной в районе Киргизского хребта Тянь-Шаня. Даны примеры аномальных отклонений регистрируемых сейсмической станцией тектонических движений от синхронных теоретических земных приливов в месте расположения станции. Они сопоставлены в интервале 2000–2018 гг. с возникновением близких по месту и времени землетрясений энергетических классов $K > 11$. Тектонические аномалии и землетрясения происходили несколько раз в одни и те же сутки. Проведено сопоставление с метеорологическими данными. Рассмотрен следующий механизм данного явления. Записи широкополосной сейсмической станции отражают изменения в гравитационном поле и вертикальные тектонические движения, вызванные перемещением воздушных масс. Этот процесс приводит к возникновению медленных подвижек и землетрясений в разломах, находящихся в условиях неустойчивого равновесия.

Ключевые слова: сейсмическая станция, тектонические аномалии, землетрясение

DOI: 10.31857/S2686739720030196

С начала 80-х годов XX века функционирует система сейсмологических наблюдений IRIS, насчитывающая сотни станций, размещенных в разных районах Земли. Часть из них оснащена велосиметрами STS-1 [1]. Чувствительность канала STS-1 на периоде 360 с составляет примерно 1 отсчет при скорости изменения перемещения грунта 1 нм/с, т.е. регистрируются перемещения на уровне нанометров. В сторону более длительных периодов чувствительность уменьшается в 100 раз с ростом периода на порядок. Этого достаточно, чтобы уверенно регистрировать скорость колебаний земных приливов с периодами 12 ч и 24 ч, при которых вертикальные перемещения земной поверхности достигают 400 мм [2], а скорости изменения составляют 2 мм/мин.

В настоящей работе мы использовали данные станций IRIS, полученные по системе INTERNET. Записи станций с дискретизацией 1 отсчет в секунду приводились осреднением к отсчетам через 10 с. Следующим шагом было подавление микросейсм секундного диапазона периодов с применением высокочастотного фильтра Гаусса

с радиусом 30 точек [3, 4]. При вычислениях применялась программа А.А. Любушина SpAn [<http://window.edu.ru/library/pdf2txt/967/71967/49364>]. Полученные временные ряды сглаживались осреднением до частоты 1 отсчет в минуту и сопоставлялись с теоретическими значениями земных приливов в точке расположения станции, вычисленными по программе [5].

В качестве основной была выбрана станция ААК (Ala-Archa) [42.64° с.ш. – 74.49° в.д.], расположенная на территории Киргизии в Тянь-Шане. На рис. 1 представлены результаты анализа записи вертикального канала LHZ с 15 до 25 февраля 2003 г. График 1 демонстрирует вертикальные теоретические перемещения поверхности Земли; график 2 – производную по времени, т.е. скорость изменения прилива. График 3 соответствует записи сейсмического канала; значения размаха записи уменьшены в 1029 раз, чтобы сопоставить с амплитудой минутных теоретических значениями скорости изменения прилива на графике 2. В графиках 1, 2 хорошо выражены 12-часовые колебания. Коэффициент корреляции значений сейсмического канала (график 3) и скорости теоретического прилива (график 2) в этом интервале составляет 0.99. Это позволяет вычислить разность колебаний, регистрируемых сейсмическим каналом по сравнению с приливом.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: sobolev@ifz.ru

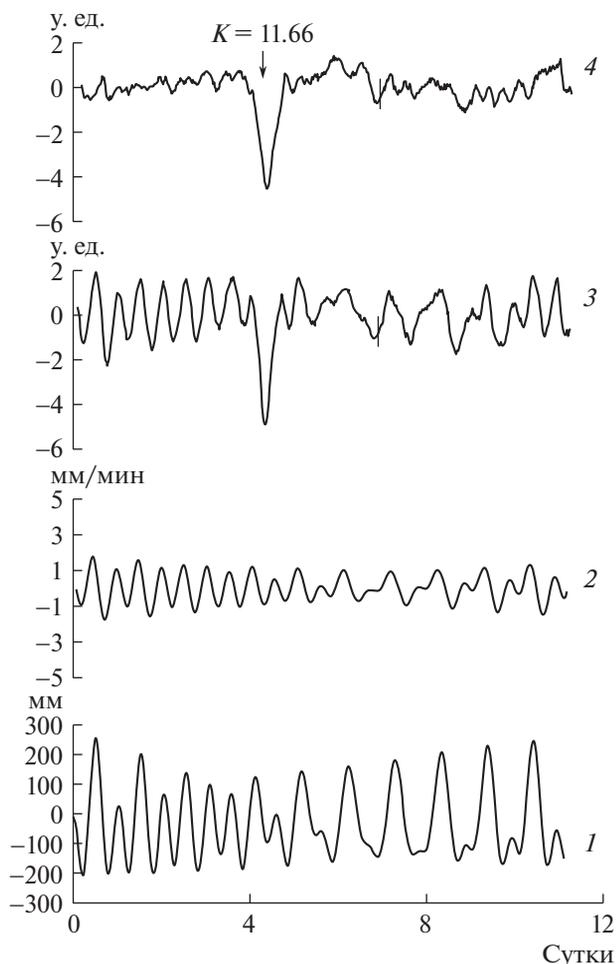


Рис. 1. Пример аномалии зарегистрированных станцией ААК тектонических движений и произошедшего в 13 км от станции землетрясения энергетического класса $K = 11.66$. 1 – теоретический прилив; 2 – скорость изменения теоретического прилива; 3 – скорость вертикального перемещения поверхности земли по данным сейсмической станции; 4 – разность амплитуды вариаций значений на графиках 3 и 2.

Соответствующий результат показан на графике 4. Стрелка над графиком 4 обозначает время землетрясения энергетического класса $K = 11.66$, т.е. с энергией $\approx 10^{12}$ Дж, которое имело координаты $[42.53^\circ \text{ с.ш.} - 74.47^\circ \text{ в.д.}]$ и произошло на расстоянии 13 км от станции ААК. Явное понижение уровня записи сейсмического канала (график 4) началось за 3.9 ч до землетрясения, а минимум отмечен через 2.2 ч после сейсмического события. Длительность аномалии ≈ 14 ч. Амплитуда наибольшего отклонения в 7 раз превышает среднеквадратическое отклонение σ в предыдущем интервале, что позволяет назвать это отклонение аномалией. Минимум аномалии соответствует началу понижения высоты прилива после максимума (график 1) и уменьшению скорости измене-

ния прилива до минимума (график 2). Из графиков 4 и 3 следует, что аномальное изменение скорости перемещения в записи сейсмического канала примерно в 2 раза превышает скорость синхронного изменения прилива.

На рис. 2 представлен следующий пример аномалии на станции ААК. Взят интервал с 15 по 26 февраля 2001 г. Графики 1, 2, 3 демонстрируют вариации теоретического прилива, изменения его скорости и запись вертикального сейсмического канала. Так же, как и на рис. 1, наблюдается высокая степень корреляции на графиках 2 и 3 до минимума на 6-е сутки. График 4 соответствует разности между графиками 3 и 2, т.е. указывает на отличия записи сейсмического канала от скорости изменения прилива. Амплитуда минимума на графике 4 в 5 раз превышает среднеквадратическое отклонение σ . Стрелка обозначает время землетрясения энергетического класса $K = 11.7$, которое произошло на расстоянии 44 км от станции с координатами эпицентра $[42.74^\circ \text{ с.ш.} - 75.00^\circ \text{ в.д.}]$. Сравнение рис. 1 и рис. 2 указывает на аналогичную форму аномалий. Отличия заключаются в следующем: а) длительность аномалии во втором случае меньше и составляет 9 ч, б) минимум аномалии во втором случае приходится на другие фазы изменения прилива и его скорости, в) землетрясение произошло до аномалии с опережением 10.3 ч. Представленные на рис. 1, 2 аномалии тектонических движений, как и другие, происходили в разных фазах изменения земных приливов, что указывает на отсутствие прямой связи между этими явлениями. Записи горизонтальных сейсмических каналов в минутном диапазоне периодов искажены интенсивным шумом и в настоящей работе не анализируются. Отметим, что аномалии, типа выше показанных, свойственны не только станции ААК. На станции АВКТ (Алибек), расположенной в том же часовом поясе в предгорьях Копет-Дага $[37.93^\circ \text{ с.ш.} - 58.12^\circ \text{ в.д.}]$, проявлены искажения, опережающие меньше чем на 3 сут по времени аномалии на рис. 1 и 2.

Сопоставление записей сейсмического канала и приливов было оправдано в тех временных интервалах, когда в работе станции не было перерывов. Из всех записей станции ААК за период 2000–2018 гг. примерно 50% не имели перерывов (9.5 лет), что позволяло вести поиск вышепоказанных аномалий. Характерной их особенностью была относительно простая форма однополярного импульса отрицательной полярности. Всего было выявлено 10 аномалий с амплитудой, в 2 раза превышающих скорость приливных колебаний и в 4 раза превосходивших среднеквадратическое отклонение σ . Для учета произошедших землетрясений был выбран окружающий станцию район с координатами от 41° до 44° с.ш. и от 73° до 76° в.д.; наибольшее расстояние от станции ААК не превышало $R = 220$ км. За время анализа ано-

малый 9.5 лет = 3470 сут в этом районе произошло 11 землетрясений $K > 11$, 37 — $K > 10$, и 111 — $K > 9$. Из них 4 землетрясения произошли в одни и те же сутки, что и тектонические аномалии. Два из них с $K > 11$ показаны на рис. 1 и 2. Кроме того, одно землетрясение характеризовалось величиной $K = 10.3$ и одно — $K = 9.28$. Случайны ли эти совпадения? Выполним небольшой анализ. Обнаружены 10 аномалий, занимающих 10 суток общего времени анализа $T = 3470$ сут. Вероятность случайного попадания одного землетрясения в одну из аномалий $p = 10/3470 = 0.0029$; вероятность непопадания $q = (1 - p) = 0.9971$. Вероятность попадания 2 из 11 землетрясений с $K > 11$ в 2 занятых аномалиями суточных интервалов может быть оценена из биномиального распределения

$$N_p P(2) = C_n^m = [n! / (n - m)! m!] p^m q^{(n-m)},$$

где $n = 11$, $m = 2$. Получаем вероятность случайного попадания $P(2) = 4.6 \times 10^{-4}$. Столь же мала вероятность попадания 3 землетрясений с $K > 10$ из 37 в 3 занятых аномалиями суток ($n = 37$, $m = 3$): $P(3) = 1.9 \times 10^{-4}$. Аналогичный результат получается при $n = 111$ и $m = 4$ для землетрясений $K > 9$: $P(4) = 4.2 \times 10^{-4}$. Уровни значимости того, что число совпадений не подчиняется биномиальному распределению, во всех трех случаях имеют значения $\alpha \approx 10^{-5}$, что много меньше критического значения $\alpha = 0.05$. Это означает, что с вероятностью > 0.99 можно принять гипотезу 1 о том, что отмеченные совпадения времени появления тектонических деформаций и землетрясений не являются случайными и вызваны общей причиной.

Предпочтительным является предположение, что явление связано с процессами в атмосфере. В работах [6, 7] авторы полагали, что регистрируемый сейсмическими станциями низкочастотный шум с периодами > 500 с вызван перемещением воздушных масс. При сопоставлении сейсмического шума на близко расположенных широкополосных сейсмических станциях [8] было показано, что станция реагирует на локальные изменения в атмосфере. Полученные там экспоненциальные закономерности увеличения амплитуды спектра мощности шума с ростом периода качественно соответствуют созданной А.Н. Колмогоровым теории локально изотропной турбулентности в атмосфере [9, 10].

С декабря 2007 г. на территории Научной станции РАН в Киргизии начала работать метеорологическая станция, которая с дискретностью 15 мин регистрирует среди прочих данные по атмосферному давлению Ратм. Она расположена в 29 км от сейсмической станции ААК. Зимние месяцы характеризуются повышенными значениями и перепадами атмосферного давления в диапазоне 800–820 мбар. В периоды развития аномалий на рис. 1 и 2 метеостанция еще не работала.

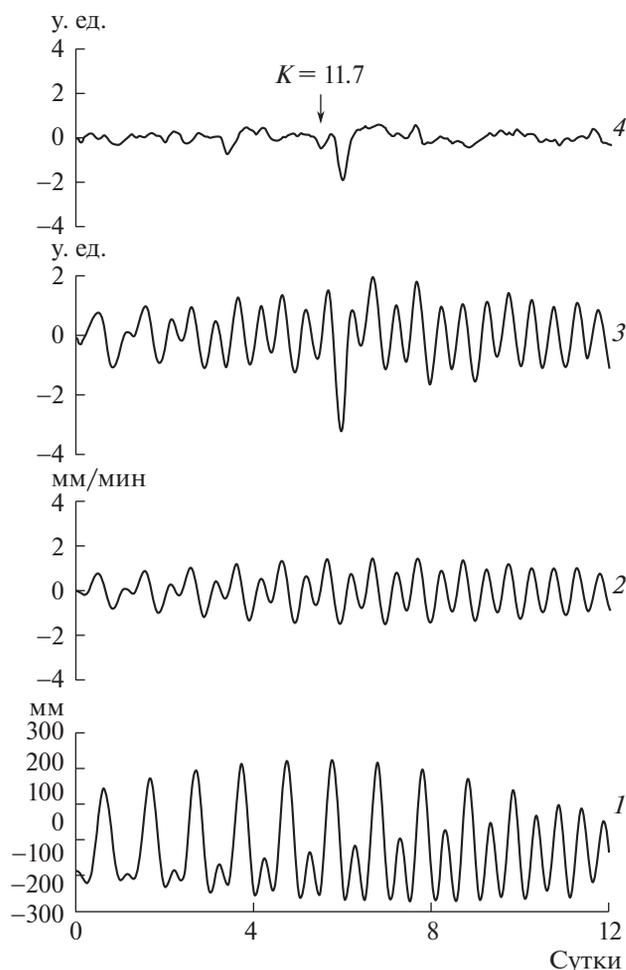


Рис. 2. Пример аномалии зарегистрированных станцией ААК тектонических движений и произошедшего в 44 км от станции землетрясения энергетического класса $K = 11.7$. 1 — теоретический прилив; 2 — скорость изменения теоретического прилива; 3 — скорость вертикального перемещения поверхности земли по данным сейсмической станции; 4 — разность амплитуды вариаций значений на графиках 3 и 2.

Сопоставление с аномалиями после 2008 г. приводит к выводу, что они приурочены к интервалам относительно больших вариаций Ратм. Для примера на рис. 3 дано сопоставление отклонений тектонических деформаций по данным сейсмического канала станции ААК от прилива (график 1) и вариаций атмосферного давления в то же время (график 2). Пример относится к интервалу 1–26 февраля 2014 г. Две аномалии 22 и 24 февраля (график 1) по форме аналогичны приведенным на рис. 1 и 2. Их длительность составляет примерно 16 и 14 ч. Повышенный перепад атмосферного давления от 796 до 818 мбар отмечен в это же время. Прямой аналогии в форме тектонических вариаций и атмосферного давления не обнаруживается. В 32 км от этой метеорологической станции

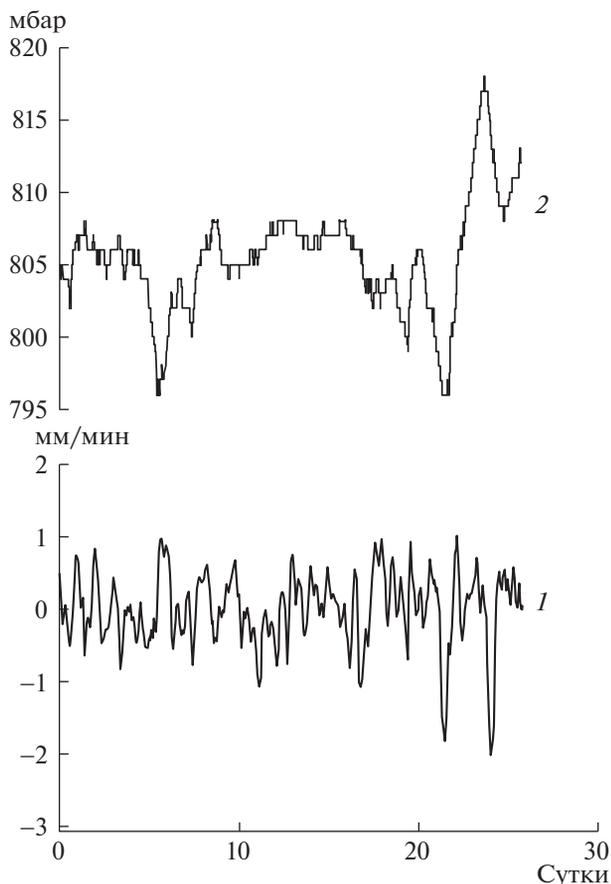


Рис. 3. Пример сопоставления аномалий тектонических движений на станции ААК (1) и вариаций атмосферного давления на метеорологической станции (2).

и в 28 км от ААК находится метеорологическая станция в г. Бишкек. Там регистрируются вариации Ратм 2 раза в сутки. Сопоставление показало, что вариации на 2 упомянутых метеостанциях в суточном осреднении идентичны с коэффициентом корреляции ≈ 0.99 . Это позволило оценить значения Ратм в дни тектонических аномалий 2003 и 2001 гг. (рис. 1, 2); они характеризовались аномально большими перепадами.

Обратим внимание на следующие обстоятельства: 1) размер разрыва в очаге при землетрясении энергетического класса $K = 11.7$ (рис. 1, 2) равен ~ 4 км [11], что в несколько раз меньше указанных выше эпицентральных расстояний до сейсмической станции ААК (13 и 44 км); 2) землетрясения возникают как до, так и после тектонической аномалии; 3) появление землетрясения практически не изменяет форму развития аномалии; 4) возникновение аномалий и землетрясений приурочено к низким значениям атмосферного давления и повышенным градиентам их изменения. Из всего вышесказанного следует предположение о механизме описанного явления. Перепа-

ды атмосферного давления вследствие перемещения воздушных масс влияют на изменения сил гравитации. Они приводят к возникновению как медленных подвижек (тектонические аномалии), так и динамических разрывов (землетрясения) в разломах, находящихся в условиях неустойчивого равновесия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность А.К. Рыбину и Н.А. Сычевой за предоставление метеорологических данных и сейсмологического каталога КНЕТ территории Геодинамического полигона Научной станции РАН в Киргизии.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана грантом РФФИ 18-05-00026.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wieland E., Streckeisen G.* The leaf-spring seismometer—design and performance // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1982. V. 72. P. 2349–2367.
2. *Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 454 с.
3. *Hardle W.* (1989) Applied nonparametric regression. Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochell, Melbourne, Sydney (Русский перевод: Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М. Мир. 1993. 349 с.)
4. *Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М. Наука. 2007. С. 228.
5. *Wenzel G.* Program PETGTAB. version 3.01.1999. Universitaet Hannover.
6. *Tanimoto T., Um J., Nishida K., and Kobayashi N.* Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days. *Geophys. Res. Lett.* 1998. 25. P. 1553–1556.
7. *Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y.* 2002. Origin of Earth's ground noise from 2 to 20 mHz. *Geoph. Res. Letters.* 2002. V. 29. № 10. P. 52-1–52.4.
8. *Соболев Г.А.* Низкочастотный сейсмический шум до и после мегаземлетрясения Суматра 26 декабря 2004 г. Доклады Академии наук. 2004. Т. 485 (4). С. 497–501.
9. *Колмогоров А.Н.* Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. Докл. АН СССР. 1941. Т. 30. № 4. С. 299–303.
10. *Голицын Г.С., Мохов И.И., Куличков С.Н.* и др. Редакционная коллегия. Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Москва, ГЕОС, 2014. С. 696.
11. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. // В сб.: Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9.

EXAMPLES OF MUTIAL APPEARANCE OF EARTH CORE DEFORMATIONS IN A FEW-HOUR PERIOD RANGE AND EARTHQUAKES

Corresponding Member of the RAS **G. A. Sobolev**[#]

Institute of Earth physics. O.Y. Schmidt of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]*E-mail: sobolev@ifz.ru*

The records from broadband seismic station AAK located at the Kirgiz ridge Tien Shan are presented. The episodes of differences between tectonic displacements and tidal oscillations were revealed. They compared with the times of local earthquakes of energetic class $K > 11$ in 2000–2018 years. The tectonic anomalies and near-by earthquakes occurred several times in the same days. The physical mechanism is suggested based on comparison with the meteorological data. The records of broadband seismic station reflect gravity variations and vertical ground deformations caused by the displacements of air masses. This process leads to arising of slow movements and earthquakes in the unstable faults.

Keywords: seismic station, tectonic anomalies, earthquake