

УДК 550.343

О ВЫДЕЛЕНИИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ В ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2023 г. М. В. Родкин^{1, 2, *}, Е. В. Липеровская^{1, 3, **}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Южно-Сахалинск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*E mail: rodkin@mitp.ru

** E-mail: liper@ifz.ru

Поведение сложных динамических систем очень изменчиво. В полной мере это относится к сейсмичности и к проявлению предвестников землетрясений. Даже в тех случаях, когда есть основания предполагать наличие предвестниковых эффектов, их часто оказывается крайне сложно выделить на фоне сильной фоновой изменчивости соответствующих систем. Предлагается и реализуется простой способ выделения искомой систематической компоненты в поведении динамических систем. Рассматриваются примеры сейсмоионосферных эффектов с использованием данных станции наземного вертикального зондирования *Kokubunji* (Токио, Япония) и режима сейсмичности в окрестности сильных ($M7.0+$) землетрясений на Камчатке. Можно предположить, что предложенный подход может оказаться эффективным и во многих других случаях.

Ключевые слова: изменчивость поведения динамических систем, систематическая компонента, ионосферные предвестники землетрясений, F область, физические механизмы землетрясений.

Для цитирования: Родкин М.В., Липеровская Е.В. О выделении систематической компоненты в изменчивости параметров динамических систем // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 2. С. 13–22. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_2_13

Введение

Интенсивно исследуемые и практически важные системы обычно относятся к типу сильно изменчивых динамических систем. В случае геофизики к таким системам относятся сейсмический режим и сейсмогенные эффекты в различных геосферах, в частности, интенсивно исследуемые сейсмоионосферные эффекты. При анализе таких эффектов обычно выявляется некоторое число формально статистически значимых, но неустойчивых и изменяющихся в разных эмпирических выборках аномалий, среди которых часто трудно с уверенностью указать аномалии, относящиеся к данному исследуемому эффекту. Обычно полагается, что решение может быть получено при привлечении большего объема данных, но такое увеличение часто практически не реализуемо. При этом и увеличение статистики может оказаться менее эффективным, чем это обычно предполагается. Для многих динамических систем характерно развитие $1/f$ фликкер-шума собственных колебаний. А это значит, что рост статистики будет частично компенсироваться увеличением доли длиннопериодных собственных колебаний рассматриваемой системы.

Все это сильно затрудняет выделение систематических особенностей поведения систем, в частности, разнообразных прогнозных эффектов. Сложность ситуации хорошо иллюстрируется результатами анализа сейсмоионосферных эффектов [Fuying et al., 2018], где по данным наблюдения вариаций величин полного электронного содержания ионосферы (ПЭС) сделан вывод, что статистически

надежных эффектов, несмотря на большой объём данных, выявить не удастся. Действительно, на разных временных интервалах и на разном расстоянии от очага землетрясений методом наложения эпох выявляется целый набор возможных аномалий, некоторые из которых не могут быть отвергнуты из статистических соображений. Какие из них действительно имеют отношение к исследуемому явлению в большинстве случаев остается не ясным. Убедительный ответ в этой ситуации мог бы быть получен при наличии развитой физической теории исследуемого явления, но такая теория обычно также отсутствует. И можно полагать, что подобная ситуация достаточно типична.

В работах [Липеровская и др., 2022; Родкин, Липеровская, 2023] для землетрясений $M6.0+$, глубиной $35 < H < 70$ км авторами по данным наземной станции вертикального зондирования *Kokubunji* (Токио, Япония) было показано локализованное уменьшение критической частоты $foF2$ на расстояниях до 600–800 км за несколько суток до и после землетрясения (этот эффект можно

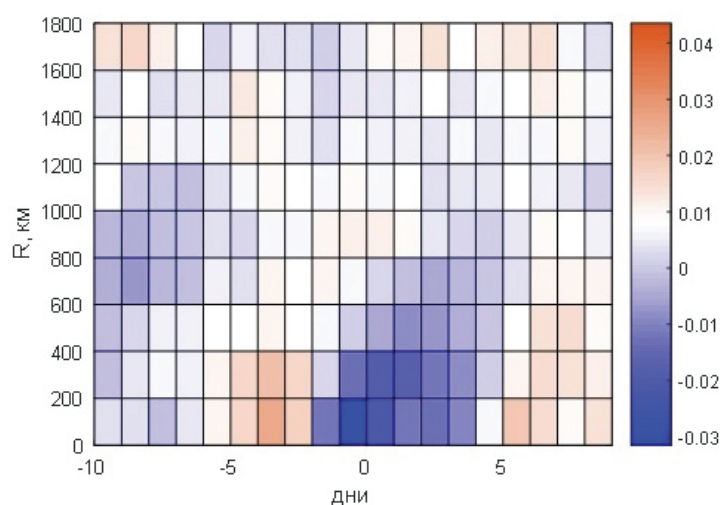
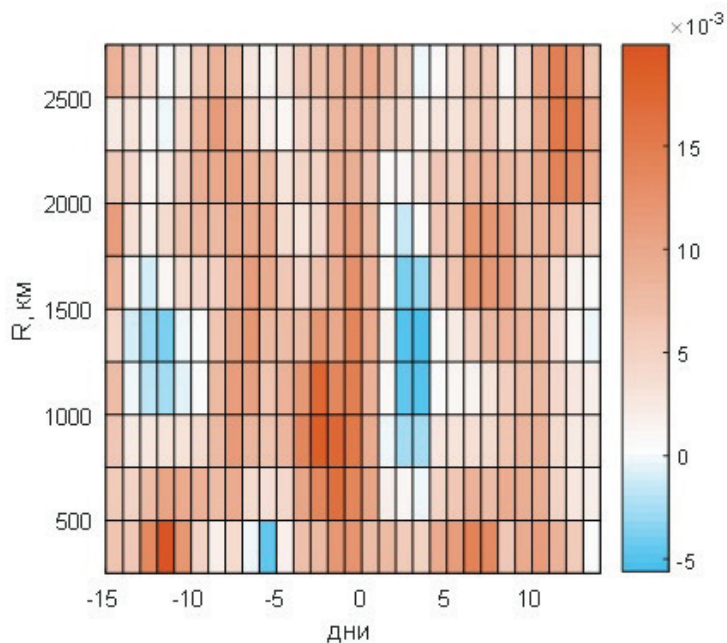


Рис. 1. Отклонения от фонового значения частот $foF2$ в окрестности землетрясений $35 < H < 70$ км, $M6.0+$ для станции *Kokubunji*. Результат наложения эпох за интервал 1957–2020 гг. Видна отрицательная аномалия в непосредственной пространственно-временной окрестности обобщенного землетрясения

Рис. 2. Отклонения от фонового значения частот $foF2$ в окрестности землетрясений $H < 35$ км, $M6.0+$ для станции *Kokubunji*. Результат наложения эпох за интервал 1957–2020 гг.



видеть на рис. 1). Для землетрясений глубиной $H < 35$ км (см. рис. 2) в этих работах было показано увеличение критической частоты $foF2$ в существенно большей пространственной области. При этом наиболее выраженная аномалия наблюдалась на расстояниях 500–1000 и 1500–2500 км от эпицентра. Различие знака и характера сейсмоионосферного отклика объяснялось различием физики процесса разрушения разноглубинных землетрясений [Rodkin, 2022]. Допущение возможности различия сейсмоионосферного отклика для разноглубинных землетрясений существенно повысило

статистическую значимость выявленных эффектов. С физической точки зрения менее понятным представлялось существование второго максимума отклика для землетрясения $H < 35$ км на расстояниях 1500–2500 км. В целом ситуация сложилась аналогично описанной в [Fuying et al., 2018], где авторы не стали утверждать, что все выявленные аномалии связаны с сейсмичностью.

Ниже предлагается возможный простой подход к выявлению искомым систематических эффектов на основе расчета коррелированности отклика системы на разных отрезках времени или при разных реализациях. Метод иллюстрируется применением к исследованию сейсмоионосферных связей и к сейсмическому режиму очаговых зон сильных ($M7.0+$) землетрясений Камчатки.

Метод и результаты, выделение сейсмоионосферных эффектов

В качестве первого примера сложной динамической системы рассмотрен случай изменчивости слоя F2 ионосферы. Поиску сейсмоионосферных эффектов в изменчивости критической частоты $foF2$ этого слоя посвящено огромное количество работ [Pulinets, Boyarchuk, 2004; Liu et al., 2006; и многие другие]. Ниже использованы часовые значения критической частоты $foF2$, полученные на станции вертикального зондирования ионосферы *Kokubunji* за 1957–2020 годы. Частота $foF2 \sim \sqrt{N_{\max}}$, где $N_{\max}$ – максимальная концентрация электронов ионосферы; данные представлены в Интернете http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/manual_txt-E.html. Для сопоставления с ионосферными данными использован каталог землетрясений ISC GEM с 1957 по 1975 гг. и GCMT с 1976 по 2020 гг., в обоих этих каталогах приводится моментная магнитуда M_w .

Диапазон изменения $foF2$, по данным станции *Kokubunji*, от 1.5 до 18 МГц. При этом в связи с суточным ходом $foF2$ систематически изменяется в 3–4 раза, в связи с 11-летним циклом – в 2–3 раза. 27-дневные вариации солнечного излучения и вариации геомагнитного излучения могут вызвать вариации $foF2$ амплитудой в несколько десятков процентов [Брюнелли, Намгаладзе, 1988].

Методы фильтрации данных и исключение более возмущенных записей описаны в работах [Родкин, Липеровская, 2023; и мн. др.]. В этих работах были выделены предположительно сейсмогенные вариации и показана их статистическая значимость. Поскольку частота $foF2$ сильно зависит от 11-летнего и 27-дневного солнечных циклов, времени суток и от сезона, то с целью уменьшения вклада таких доминирующих вариаций при поиске предполагаемых сейсмоионосферных аномалий величин $foF2$ для каждого часа рассматриваются отклонения $foF2$ от скользящей медианы, нормированные на эту же медиану

$$\Delta f_i = (foF2_i - median(foF2)) / median(foF2), \quad (1)$$

где $median(foF2)$ – медиана значений $foF2$ за -7, +7 суток вокруг i -го часа, который полагался нулевым. В данных имеются пропуски – не работала станция, исключались дни с сильными геомагнитными возмущениями ($\sum Kp > 25$ и следующие сутки), или значения $foF2$ не были определены по иным причинам – медиана (1) вычислялась при наличии не менее 8 значений из 15 возможных. Интервал времени усреднения (-7, +7) выбран как компромисс между требованием лучшего статистического осреднения и желанием уменьшить вклад сильного 27-дневного солнечного цикла.

В работах [Липеровская и др., 2022; Родкин, Липеровская, 2023] мы приняли во внимание, что физический механизм разноглубинных землетрясений различается [Rodkin, 2022; Родкин, Липеровская, 2023]; соответственно, могут различаться и сейсмоионосферные отклики. Поэтому отдельно рассматривались землетрясения с глубиной до 35, от 35 до 70 и глубже 70 км; выбор таких глубинных границ аргументирован в указанных работах. Для таких разноглубинных землетрясений было продемонстрировано различие характера сейсмоионосферного отклика. Открытым, однако, остался вопрос, действительно ли выбранные и статистически подтвержденные аномалии вызваны процессами подготовки и реализации землетрясения, или они порождены иными причинами. Выбор статистически подтверждаемых аномалий из набора видимых аномалий также часто оставался в определенной степени дискуссионным.

Ниже рассматриваются события с глубинами до 35 км и от 35 до 70 км. Более глубоких событий слишком мало, и используемым ниже способом разбивать их на подвыборки нецелесообразно.

Вначале приведем результаты для землетрясений с глубиной от 35 до 70 км, потом рассмотрим сейсмоионосферные отклики для менее глубоких событий; причины именно такой последовательности будут видны из дальнейшего. На рис. 1 изображены осредненные по соседним точкам (± 1 ячейка по осям времени и расстояния от очага) значения Δf для интервалов времени ± 10 дней относительно часа землетрясения с магнитудой $M_w 6.0+$ на расстояниях до 2000 км от события и с шагом 200 км. Как видно на рисунке, в близкой пространственно-временной окрестности обобщенного землетрясения $M_w 6.0+$ наблюдается четко выраженная отрицательная аномалия. Пространственно-временная приуроченность к сейсмическому событию и выраженность аномалии дают основание рассматривать ее как сейсмогенную. Заметим, что амплитуда этой аномалии невелика, в пределах 1–3%, что много меньше амплитуд вариаций f_oF2 , вызванных вариациями солнечной и геомагнитной активности.

Существенно менее однозначна ситуация для землетрясений с глубиной менее 35 км. На рис. 2 приведены средние отклонения величин f_oF2 для таких землетрясений, рассчитанные аналогичным образом. Вблизи очага явной аномалии не видно. Но выделяется область положительных аномалий на большем расстоянии от эпицентра, наблюдаемая за несколько дней до события и 1–2 дня после обобщенного сильного землетрясения. Аномалия захватывает область до примерно 1750 км от эпицентра, причем наиболее выражена в интервале 500–1000 км. В области вблизи эпицентра обобщенного землетрясения также наблюдается положительная аномалия, но меньшей амплитуды, не выделяющейся на фоне иных аномалий.

Заметим, что кроме указанной аномалии имеется и ряд других, возможно, также статистически верифицируемых аномальных областей как положительных, так и отрицательных. С целью большей представительности область расчета отклонений увеличена до ± 15 дней относительно времени обобщенного землетрясения и до 2750 км – от эпицентра. Максимальная величина отклонений от среднего фонового значения составляет около 2%. Вообще говоря, не ясно, какие из наблюдаемых аномалий следует рассматривать, как сейсмогенные. Качественно аналогичные результаты были получены в [Fuying et al., 2018], где по существенно более статистически обеспеченным данным полного электронного содержания (ПЭС) также наблюдался ряд возможных аномалий на различном расстоянии от обобщенного землетрясения и сделан вывод, что вполне надежно сейсмоионосферные эффекты выявить не удастся. Повторимся, наблюдаемые аномалии для каждого данного набора данных статистически не вполне случайны, но не ясно, какие из них порождены сейсмоионосферными эффектами, а какие – иными причинами.

Попробуем выделить среди всего набора аномалий особенность, связанную с сейсмоионосферными эффектами. Резонно предположить, что сейсмоионосферные аномалии в выборке, полученной методом

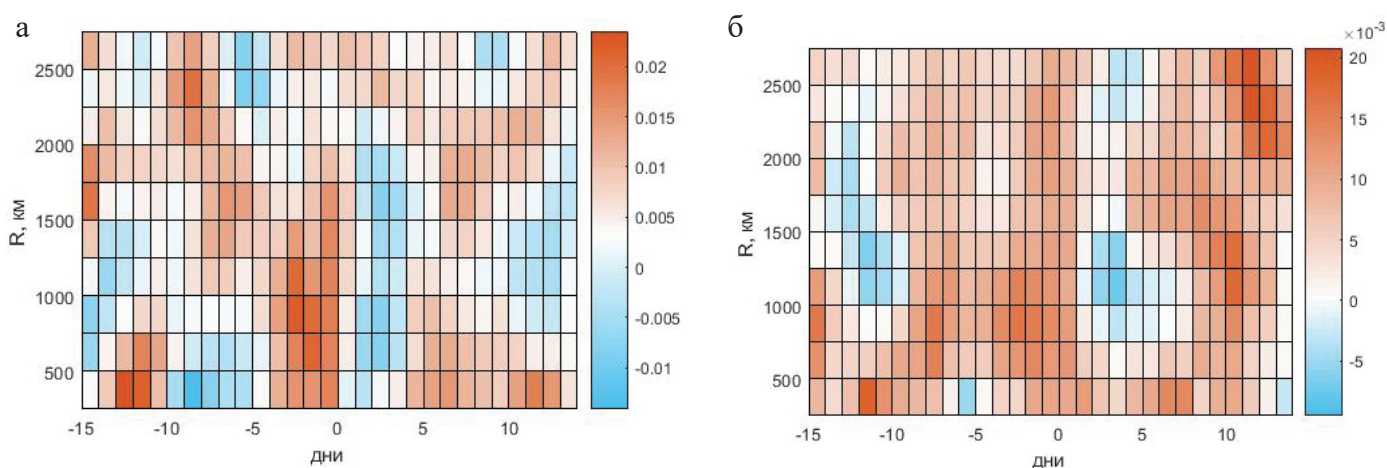


Рис. 3. Отклонения от фонового значения частот f_oF2 в окрестности землетрясений $H < 35$ км, $M6.0+$ для станции *Kokubunji*. Результаты наложения эпох для двух непересекающихся интервалов времени 1957–1988 (а) и 1989–2020 гг. (б)

наложения эпох, будут более стабильны, а иного рода отклонения – более случайны. Соответственно, наблюдаемые в разных подвыборках сейсмогенные аномалии будут более единообразны, чем отклонения иной природы. Разобьем интервал времени наблюдения на две примерно равные по представительности части, за 1957–1988 и 1989–2020 гг. Характер полученных в окрестности обобщенного землетрясения отклонений от фона для интервалов 1957–1988 и 1989–2020 гг. визуально довольно различен (см. рис. 3). Рассчитаем скользящий коэффициент корреляции значений Δf для этих двух интервалов времени, используя совокупности точек 3×3 ячейки (± 1 ячейка по времени и по расстоянию). Для граничных ячеек такой расчет невозможен, они далее не рассматриваются, значения коэффициентов корреляции для таких граничных областей полагались равными $R = 0$. Метод расчета корреляций не был применен выше к аномалии для землетрясений с глубиной от 35 до 70 км; в этом случае аномалия сильнее всего для граничных точек (рис. 1), а корреляцию для них предложенным методом оценить нельзя.

На рис. 4а представлены рассчитанные скользящие коэффициенты корреляции для значений Δf для интервалов времени 1957–1988 и 1989–2020 гг. Видна обширная область повышенных значений коэффициентов корреляции на расстояниях до 1500 км от очага, начинающаяся примерно за 10 дней до землетрясения и продолжающаяся 3 дня после. При перемножении коэффициентов корреляции на значения отклонений от среднего для всего интервала времени (рис. 2) получаем четко выраженную аномалию на расстояниях от 500 до 1500 км от очага в интервале примерно 5 дней до события и одного дня после (рис. 4б). Амплитуда аномалии, по сравнению с рис. 2, уменьшилась вследствие умножения на значение коэффициента корреляции. По-видимому, есть основания полагать именно эту аномалию сейсмогенной.

Выше мы разделили исходный набор данных на две подвыборки по времени. Но предлагаемый

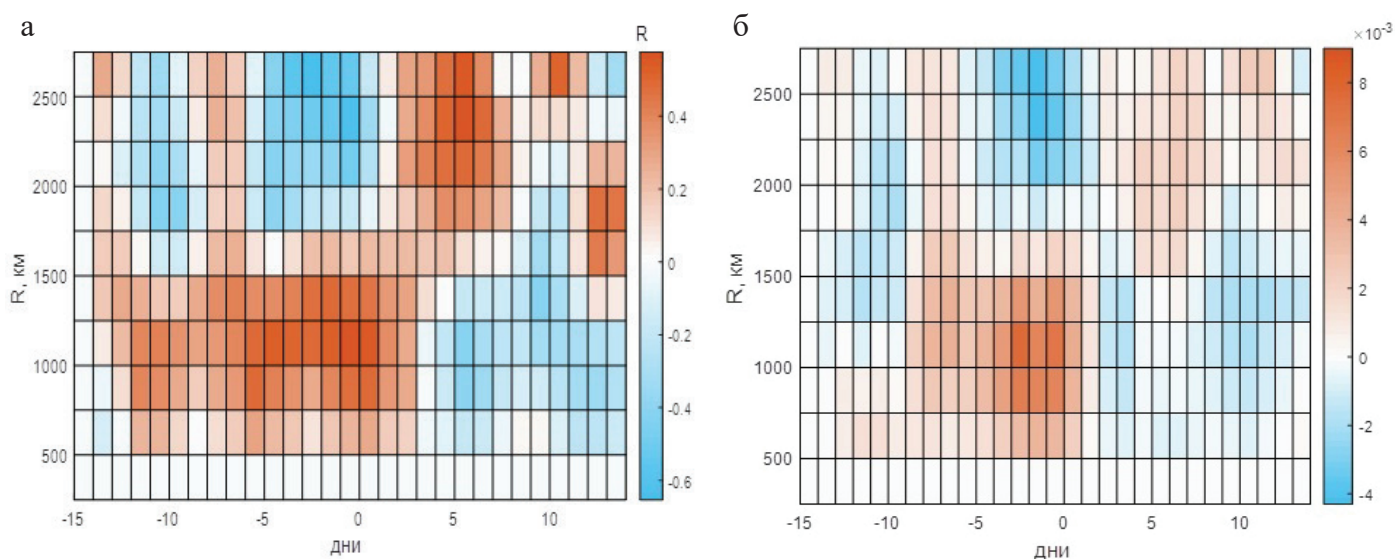


Рис. 4. Скользящие значения коэффициентов корреляции для величин отклонений от фонового значения частот f_oF2 в окрестности землетрясений $H < 35$ км, $M6.0+$ (а) и устойчивая аномалия (б) для двух непересекающихся интервалов времени 1957–1988 и 1989–2020 гг., станция *Kokubunji* (данные рис. 3)

метод, вообще говоря, допускает разные способы формирования подвыборок (в том числе и случайным образом). Некоторые, не случайные, способы формирования подвыборок могут представлять специальный интерес. К таковым относится, например, различие землетрясений, происшедших к северу и югу от станции зондирования: к северу и югу, в зону субдукции, погружаются тектонические плиты существенно разного возраста, с различной скоростью. Также возможно изменение характера сейсмоионосферного эффекта от широты. При этом событий к северу значительно больше, чем к югу – 331 и 126 соответственно (для землетрясений до 2000 км от станции). Поэтому рассмотрим события, расположенные к северу от станции *Kokubunji*, как более типичные для нее.

На рис. 5а приведены величины отклонений за весь интервал времени 1957–2020 гг., $H < 35$ км. Визуально аномалии на рисунке не выделяются, хотя области развития положительной аномалии, наблюдаемой ранее на рисунках 2 и 4, отмечают положительные значения отклонений Δf . Применив предложенный метод, для землетрясений к северу от станции, разделим время наблюдения на два интервала: 1957–1988 и 1989–2020 гг. и проведем процедуру, аналогичную описанной выше. На рис. 5б, аналогичном рис. 4б, приведены скользящие произведения значений полученных коэффициентов корреляции для интервалов времени 1957–1988 и 1989–2020 гг. на исходные средние значения отклонений Δf , показанные на рис. 5а. На рис. 5б уже вполне четко видна положительная аномалия, по пространственно-временным характеристикам аналогичная, изображенной на рис. 4б.

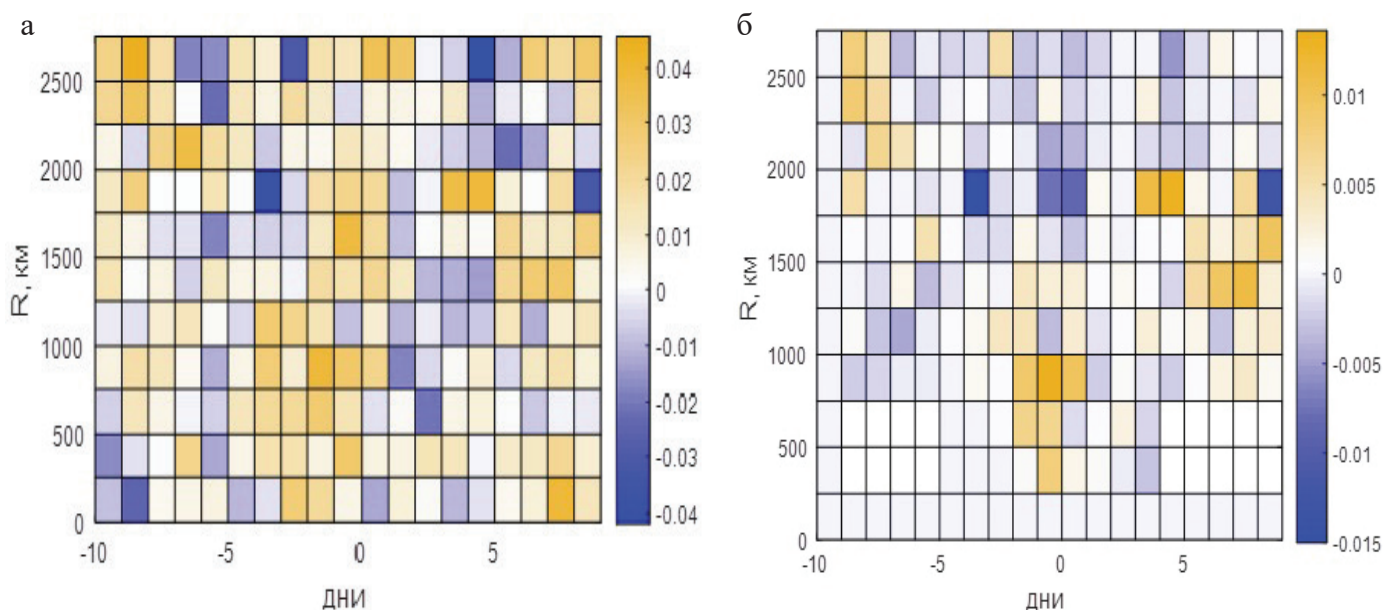


Рис. 5. Наблюдаемая средняя аномалия для частот $foF2$ (а) и результат выделения устойчивой компоненты аномалии (б) для совокупности землетрясений, расположенных к северу от станции вертикального зондирования *Kokubunji*, $M6.0+$, $H < 35$ км

Как уже отмечалось, южнее станции вертикального зондирования число землетрясений меньше. Для совокупности этих землетрясений устойчивых особенностей в поведении величин Δf выявить не удалось. Возможно, сказывается несколько меньший объем данных. Но не исключено, что имеет место и анизотропия в характере проявления сейсмоионосферных эффектов.

В заключении обсуждения случая сейсмоионосферных эффектов вновь подчеркнем различный характер эффектов для разноглубинных землетрясений. Вообще говоря, это вполне ожидаемо. В качестве физических механизмов сейсмоионосферных связей указывает – выделение радона, изменение эффективной электропроводности в очаговой зоне и возникновение акустико-гравитационных волн [Липеровский и др., 2008]. Эти последние распространяются под углом к горизонту и могут вызывать сейсмоионосферные эффекты на значительном удалении от эпицентра. Удаленные сейсмоионосферные эффекты были выявлены у землетрясений с глубиной менее 35 км. Это представляется резонным, так как из физических соображений трудно ожидать возникновения акустико-гравитационных волн от более глубоких землетрясений.

Метод и результаты; общая компонента в окрестности сильных землетрясений Камчатки

В качестве другого примера выявления общих статистических особенностей однотипных процессов рассмотрим режим сейсмичности в окрестности сильных землетрясений. В [Rodkin, Tikhonov, 2016;

Родкин, 2020; и др.] было показано, что методом построения обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) для большого числа (от сотни до тысячи) отдельных сильных землетрясений удастся существенно уточнить типичный характер предвестниковой и постшоковой активизации. Заметим, что характер таких изменений оказался более сложным, включающим не только фор- и афтершоковые степенные каскады числа событий. При наложении эпох по пространству в этих работах проводилась нормировка расстояния от эпицентра главного события на размер его очага. Применим предлагаемый метод к анализу существенно меньшего числа окрестностей отдельных сильных землетрясений (не сотни, а немногим более десяти; ранее было показано, что такой объем данных явно недостаточен для построения содержательной обобщенной окрестности сильного землетрясения). Продемонстрируем, что даже для такой малой совокупности данных удастся выявить пространственно-временную область единообразного закономерного изменения сейсмического режима.

В качестве примера рассмотрим сейсмичность Камчатки по данным регионального каталога с 01.01.1962 по 30.10.2020 гг., включающего данные по территории Камчатки, Командорских островов и Северных Курил. Каталог удовлетворительно полон для магнитуд $M \geq 3.6$; иной отбраковки по магнитуде или глубине ниже не проводилось. Рассматривались события в окрестности землетрясений $M7.0+$ в пределах 5 размеров очага, соответствующего главного землетрясения, где размер очага L задавался формулой [Соболев, 1993]

$$L(\text{км}) = 10^{(0.5M - 1.9)}. \quad (2)$$

Диапазон по времени составлял ± 30 дней с шагом 2 дня и детализацией шаг 1 день в диапазоне ± 2 дня от момента события. По расстоянию границы ячеек составляли 0.5, 1, 2, 3, 4 и 5 размеров очага главного события L . Для всех пар окрестностей сильных событий $M7.0+$ (всего 11 таких землетрясений) рассчитывались скользящие коэффициенты корреляции для числа событий в пространственно-временной ячейке (данная и следующие ячейки по пространству и времени, всего 4 ячейки).

На рис. 6 отражены статистически значимые (примерно на уровне 10%) средние значения коэффициентов корреляции для всех рассматриваемых пар окрестностей сильных событий. Видно, что статистические режимы единообразны (значимые положительные корреляции) в области до трех размеров очага главного события в афтершоковой зоне, и, возможно, в области самых поздних форшоков (в пределах 1 дня до главного события). Фактически, приведенный результат не дает новой информации, а только свидетельствует, что для афтершоковой области характерно выполнение единообразного закона Омори. Таким образом, второй пример применения метода является только подтверждением его корректности, не более того. Заметим, что число сильных $M7.0+$ событий

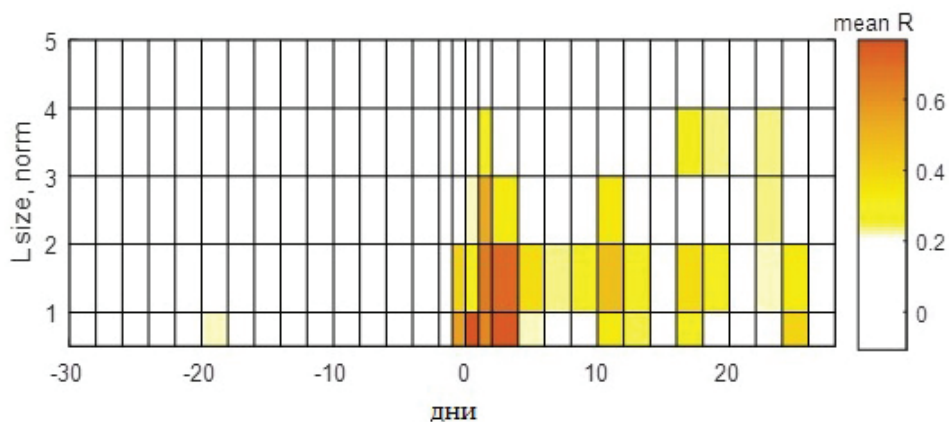


Рис. 6. Средние значения скользящего коэффициента корреляции (*mean R*) между парами пространственно-временных окрестностей $M7.0+$ землетрясений Камчатки. По оси x – дни до и после сильных землетрясений, по оси y – нормированные размеры очага, $L \text{ size norm}$. Видно, что области развития афтершокового процесса и самых поздних форшоков отвечают развитию значимых средних положительных корреляций

(всего 11) здесь много меньше ранее использовавшегося при построении ООСЗ (в цитированных выше статьях анализировались окрестности для 300, 500, а чаще 1000 сильнейших землетрясений). Такой объем данных заведомо не позволяет построить детальную и устойчивую ООСЗ.

Подчеркнем, что по логике метода допустим и усложненный его вариант, когда тем или иным способом, по имеющимся данным, формируется значительное число случайных подвыборок, а затем на их множестве определяется как типичный характер эффекта, так и величина разброса (по аналогии с широко известным бутстреп-методом численного статистического анализа).

Заключение и выводы

При исследовании сильно изменчивых динамических систем часто возникает задача выделения относительно слабой, предположительно связанной с данным исследуемым эффектом, компоненты на фоне более сильных незакономерных флуктуаций иной природы. При этом стандартно применяемый метод наложения эпох часто не обеспечивает убедительного результата выделения искомой компоненты.

Предложен способ выделения систематической компоненты в сложном поведении сильно изменчивых динамических систем на основе расчета скользящих коэффициентов корреляции при сравнении выборок, формируемых тем или иным способом из доступного набора данных. Заметим, что в недавней работе [Богданов, Павлов, 2021], расчет коэффициентов корреляции проводится с противоположной целью – выявить возникшее различие, ввиду дополнительного воздействия процесса подготовки близкого землетрясения на ионосферу, над одной из станций наземного вертикального зондирования.

Метод иллюстрируется примерами выявления сейсмоионосферных аномалий по данным станции вертикального зондирования ионосферы *Kokubunji* (Токио, Япония) и режима сейсмичности в окрестности сильных землетрясений Камчатки. Для землетрясений $M_{6.0+}$ с глубиной $H < 35$ км применение метода подтвердило увеличение ионизации на высотах главного ионосферного максимума на расстояниях 500–1500 км и показало нестабильность (случайность) ранее выявленного максимума ионизации на расстояниях от 1500 до 2500 км от эпицентра. Для случая анализа сейсмического режима в окрестности немногочисленных сильных землетрясений Камчатки показано единообразие их режима в области развития афтершокового процесса; такой результат не несет новой информации, но свидетельствует в пользу корректности метода.

Можно предположить, что предложенный подход может оказаться эффективным и в других случаях. В частности, подход может оказаться полезным при разработке алгоритмов прогноза землетрясений для выделения слабых, но систематических предвестниковых эффектов. В этом плане метод может оказаться полезным дополнением к методу анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 23-27-00395 «Комплекс аномалий в обобщенной окрестности сильного землетрясения; физика процесса и использование в целях прогноза»).

Благодарности

Авторы признательны рецензентам, учет замечаний которых способствовал улучшению статьи.

Список литературы

Богданов В.В., Павлов А.В. Идентификация ионосферных предвестников землетрясений в Камчатском регионе на основе корреляционного анализа // Вестник КРАУНЦ: Физ.-мат. науки. 2021. Т. 37. № 4. С. 150–158. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-150-158.

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 1988. – 527 с.

Липеровская Е.В., Родкин М. В., Силина А.С. О радиусе проявления предвестников землетрясений в F-области ионосферы. В сб. «Проблемы Геокосмоса»: Материалы 14-ой международной школы-конференции / Отв. редакторы С. В. Апатенков и др. СПб. : Скифия-принт, 2022. С. 114–122.

Липеровский В.А., Мейстер К.-В., Липеровская Е.В., Похотелов О.А. Физические модели связей в системе литосфера-атмосфера-ионосфера перед землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 6. С. 831–843.

Родкин М.В. Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 64–76

Родкин М.В., Липеровская Е.В. О различии физических механизмов разноточинных землетрясений и характера их ионосферного отклика // Физика Земли. 2023, № 3. С. 48–62.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М. : Наука. 1993. – 314 с.

Fuying Zhu, Fanfan Su, Jian Lin. Statistical analysis of TEC anomalies prior to M6.0+ earthquakes during 2003–2014 // Pure Appl. Geophys. 2018. Vol. 175. P. 3441–3450.

Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J. and Chen C.S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. A05304. DOI: 10.1029/2005JA011333.2006.

Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin: Springer, 2004. – 215 p.

Rodkin M.V., Tikhonov I.N. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2016. Vol. 95. P. 73–84.

Rodkin, M.V. The Variability of Earthquake Parameters with the Depth: Evidences of Difference of Mechanisms of Generation of the Shallow, Intermediate-Depth, and the Deep Earthquakes // Pure Appl. Geophys. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4>

ON THE DETECTION OF A SYSTEMATIC COMPONENT IN THE VARIABILITY OF THE PARAMETERS OF DYNAMICAL SYSTEMS

© 2023 M. V. Rodkin^{1, 2, *}, E. V. Liperovskaya^{1, 3, **}

¹*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno Sakhalinsk, Russia*

³*Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E mail: rodkin@mitp.ru

** E-mail: liper@ifz.ru

The behavior of complex dynamical systems is highly variable. This fully applies to seismicity and to the manifestation of earthquake precursors. Even in those cases where there are grounds for assuming the presence of precursor effects, they are often extremely difficult to distinguish against the strong background variability of the corresponding systems. A simple method for detecting of the desired systematic component in the behavior of dynamical systems is suggested and implemented. Examples of seismoionospheric effects are considered using data from the Kokubunji ground-based vertical sounding station (Tokyo, Japan) and the seismicity regime in the vicinity of strong ($M7.0+$) earthquakes in Kamchatka. It can be assumed that the proposed approach can be effective in many other cases.

Keywords: variability in the behavior of dynamical systems, systematic component, ionospheric precursors of earthquakes, F region, physical mechanisms of earthquakes.