

УДК 550.343

О СОПОСТАВЛЕНИИ СВОЙСТВ СТАТИСТИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНАЛА ОТ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СЕРЕДИНЕ РУССКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ И В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНОМ РЕГИОНЕ

© 2023 г. А. Е. Вольвач¹*, Л. П. Коган², К. Х. Канониди³,
И. Т. Бубукин⁴, О. В. Боборыкина⁵, В. Б. Штенберг², Л. Н. Вольвач¹

¹Отдел радиоастрономии и геодинамики, Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Кацивели, Крым, Россия

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия

⁴Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

⁵Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

*e-mail: volvach@bk.ru

Поступила в редакцию 14.07.2022 г.

После доработки 07.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

В статье исследованы свойства мелкомасштабных флуктуаций плотности вероятности для измерений X , Y и Z -составляющих магнитного поля Земли, проведенных как в сейсмоактивном регионе, так и в области с полным отсутствием сейсмической активности. В первом случае выявлен факт значительно большей интенсивности возникновения статистических феноменов, рассматриваемых как предвестники землетрясений. На интервале в несколько суток перед землетрясением с магнитудой 5.3 в Metsavan (Armenia), эпицентр которого был расположен рядом с магнитовариационной станцией в сейсмоактивном регионе, констатировано резкое увеличение частоты указанных явлений. Этот эффект отсутствовал в сейсмически спокойном регионе.

DOI: 10.31857/S0016794022600454, EDN: DLPQCP

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, следует считать поиск путей прогнозирования и предупреждения разномасштабных геофизических и связанных с ними техногенных катастроф. Эти события напоминают нам, что проблема надежного прогнозирования стихийных бедствий и наведенных (спровоцированных) катастрофических событий становится все более актуальной, особенно если учесть, что около трети населения Российской Федерации проживает в сейсмоопасных районах, где созданы и эксплуатируются атомные электростанции и другие промышленные предприятия [Собисевич, 2012].

Считается, что аномалии обусловлены деформационными процессами в литосфере. Зона подготовки, соответствующая сильному землетрясению, имеет характерные размеры порядка сотен и даже тысячи километров. Крупномасштабный

характер наблюдаемых аномальных возмущений естественных полей Земли, вызванных подготовкой сейсмического события, может помочь обнаружению аномальных структур путем изучения волновых процессов лабораторными комплексами и дистанционными наблюдениями. Радиус зоны действия деформационных процессов оценивается как $R \sim \exp(M)$ [Добровольский, 1991, 2009]. Для землетрясений с магнитудой $M \sim 5$ имеем $R \sim 500$ км (эта величина много больше, чем собственно радиус области подготовки событий подобного диапазона M). Однако аномалии обнаруживаются не в каждой точке этой зоны, а лишь в так называемых “чувствительных зонах” земной коры.

Существует предположение, что образующиеся перед землетрясениями и несущие положительный заряд микротрещины, определяющие структуру и электростатический заряд опреде-

ленных образований в геологической среде, передают его из фокальной области к поверхности Земли. Лабораторные эксперименты подтверждают возможность реализации этого механизма [Freund, 2013]. Такие электрические поля, возникающие перед землетрясениями вблизи поверхности Земли, сопровождаемые появлением и атмосферных (ионосферных) аномалий перед землетрясениями, наблюдались в виде свечений над эпицентрами будущих сейсмических событий.

Возможность обнаружения сейсмических и электромагнитных излучений зависит от уровня естественного или промышленного фона перед сейсмическим событием, параметров земной коры и структуры очага конкретного события. Поэтому, несмотря на наличие ряда убедительных эффектов, стандартная статистика, как правило, пока показывала низкую достоверность отдельных сейсмических, электрических, магнитных и других аномальных явлений.

В настоящее время много внимания уделяется математическим методам анализа волновых структур, отражающих особенности геофизических процессов в литосфере и других геосферах. Одним из основных преимуществ этого нового направления, основанного на разработке физических и применении современных математических и механико-математических моделей, является возможность “избирательного подхода” при изучении особенностей строения реальной геофизической среды. Особого внимания заслуживает то обстоятельство, что математическое моделирование позволяет по-новому подойти к анализу данных полевых наблюдений.

Современные математические модели геофизической среды достаточно многообразны. Здесь следует выделить класс механико-математических моделей, которые активно развиваются в настоящее время. Эти модели обладают различной степенью сложности и общности, что и определяет круг решаемых задач [Собисевич, 2001]. Простейшей моделью является модель однородного полупространства, позволяющая ответить на некоторые вопросы взаимодействия поверхностных источников сейсмических колебаний с грунтом [Бабешко и др., 1983; Чичинин, 1984]. Характеризуя научные достижения в области математической геофизики, следует отметить, что в настоящее время эти задачи приобретают особую актуальность.

Сейсмоэлектромагнитные явления служат чувствительным индикатором процессов развития землетрясений. Поскольку электромагнитные возмущения распространяются на значительные расстояния от источника и легко детектируются, они могут эффективно использоваться для разработки методов прогноза землетрясений. Зона подготовки сильного землетрясения имеет харак-

терные размеры порядка сотен и даже тысяч километров. Крупномасштабный характер наблюдаемых аномальных возмущений естественных полей Земли, вызванных подготовкой сейсмического события, может помочь обнаружению аномальных структур путем изучения волновых процессов лабораторными комплексами.

В данной статье на основании подхода [Volvach et al., 2022a, b, c, d, e; Вольвач и др., 2022; Kogan et al., 2021; Коган, 2015] исследуются свойства статистического функционала от совокупности измерений X -, Y - и Z -компонент геомагнитного поля, проведенных с 1 по 15 февраля 2022 г. Рассматриваются свойства совокупности данных, полученных как на магнитовариационной станции геофизического полигона Борок Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, установленного на севере Ярославской области, так с помощью магнитометра GLK, находящегося на территории Армении в момент землетрясения магнитудой 5.3 (Metsavan, Armenia, 2022-02-13, 18:25:56 UTC), которое произошло в пределах рассматриваемого интервала времени.

Таким образом, основной целью данной работы является выявление различия свойств статистики двух соответствующих больших ансамблей результатов измерений. С учетом очевидной разницы геофизических условий на Южном Кавказе и в центральной части Русской континентальной платформы (Русской плиты), анализ подобного отличия, в частности, может помочь продвинуться в решении задачи определения координат приближающегося сейсмического события.

2. ДАННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ

Далее будем считать, что любое физическое поле $x(t)$, измеряемое в сейсмоактивных регионах, может быть представлено в виде следующей суммы:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t). \quad (1)$$

В (1) случайная величина $x_1(t)$ – фоновый шум, то есть совокупность обычно наблюдаемых случайных процессов, включая сюда шум самой измерительной аппаратуры. Тогда как случайный процесс $x_2(t)$ полагаем вызванным интенсивными явлениями разлома литосферных плит на ослабленных участках земной коры во время “итоговой подготовки” приближающегося землетрясения. По аналогии с [Volvach et al., 2022a, b, c, d, e; Вольвач и др., 2022; Kogan et al., 2021; Коган, 2015] в роли основной гипотезы в этой статье принимается предположение о статистической независимости (или слабой зависимости) этих двух случайных слагаемых.

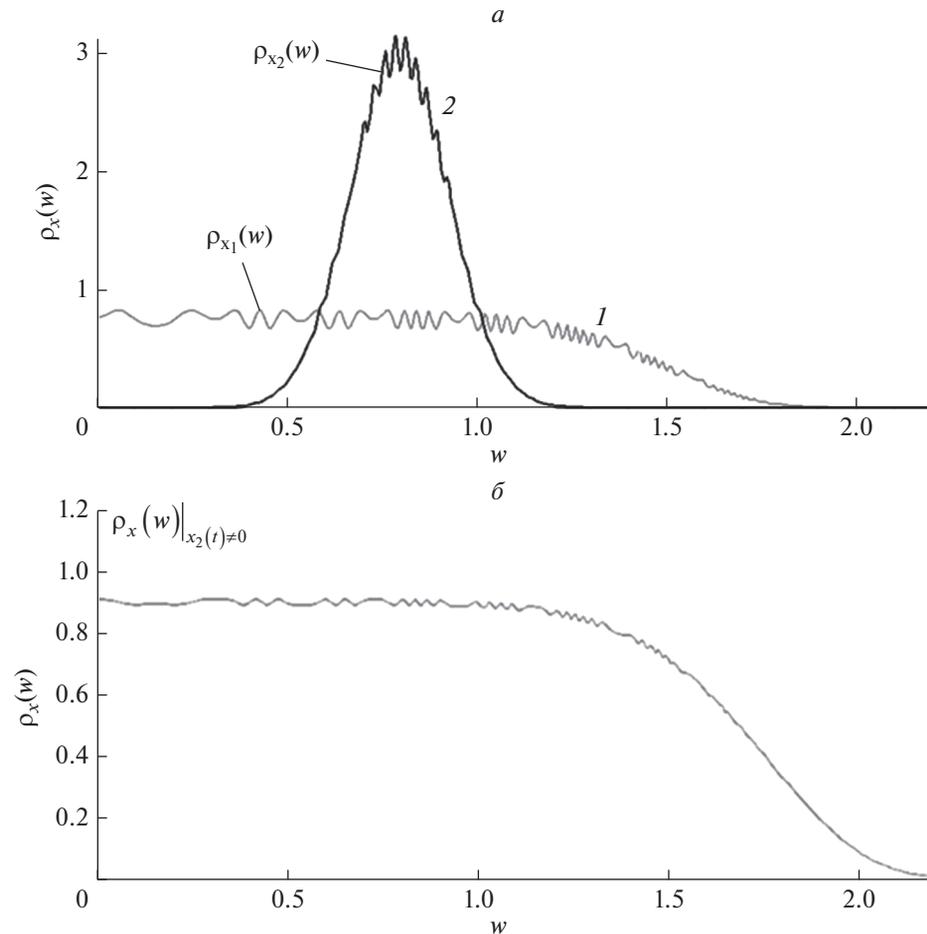


Рис. 1. (а) Схематический вид непрерывных экспериментальных плотностей вероятности $\rho_{x_1}(w)$ (кривая 1) и $\rho_{x_2}(w)$ (кривая 2) для значений случайных процессов $x_1(t)$ и соответственно $x_2(t)$ для выбранного отрезка реализации. (б) Схематический вид непрерывной экспериментальной плотности вероятности $\rho_x(w)$ для значений случайной величины $x(t)$ на данном отрезке реализации при существовании независимого случайного процесса $x_2(t)$ для этого отрезка и выполнения условия соизмеримости ширины распределения $\rho_{x_2}(w)$ с несколькими периодами мелкомасштабных флуктуаций зависимости $\rho_{x_1}(w)$.

С целью получения статистики значений случайной величины $x = x(t)$ разделим весь интервал времени измерений случайного процесса $x(t)$ на отдельные отрезки реализации с одинаковой продолжительностью. На рис. 1а схематически изображена экспериментальная плотность вероятности $\rho_{x_1}(w)$ для значений случайного процесса $x_1(t)$ на заданном отрезке реализации (кривая 1), которая совпадала бы с плотностью вероятности $\rho_x(w)$ при тождественном отсутствии на этом отрезке слагаемого $x_2(t)$. Здесь же также схематически приведена экспериментальная плотность вероятности $\rho_{x_2}(w)$ (кривая 2) для этого же отрезка реализации, которая отвечала бы значениям процесса $x_2(t)$, если бы их можно было каким-то об-

разом измерить. (На рис. 1а, 1б для повышения наглядности рассматривается случай непрерывных зависимостей $\rho_{x_{1,2}}(w)$, хотя при проведении измерений обычно имеют место их дискретные варианты; кроме того, с той же целью на этих схематических рисунках допускается приближенное выполнение условия нормировки.) Обе соответствующие кривые являются “шероховатыми”, то есть содержащими большее число мелкомасштабных малых флуктуаций. Это свойство является следствием возникновения в функциях $\rho_{x_{1,2}}(w)$ случайной составляющей, связанной с ограниченным числом отсчетов.

Плотность вероятности $\rho_x(w)$ для суммы (1) двух независимых случайных величин может быть записана в форме свертки вида:

$$\rho_x(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{x_1}(w') \rho_{x_2}(w-w') dw'. \quad (2)$$

Из анализа интеграла (2) следует, что если ширина распределения $\rho_{x_2}(w)$ хотя бы в несколько раз превосходит период указанных мелкомасштабных флуктуаций зависимости $\rho_{x_1}(w)$, то, в результате выполнения свертки (2), произойдет усреднение этих мелкомасштабных возмущений, следствием чего станет уменьшение их амплитуды, понимаемой как величина эффективного отклонения от нулевого уровня соответствующих флуктуаций. На рис. 1б приведено схематическое изображение зависимости $\rho_x(w)$, отвечающей таким условиям. Принципиально важным является вывод, что подобное изменение амплитуды малых флуктуаций при появлении в системе “дополнительного” независимого случайного слагаемого вполне может быть зафиксировано, в частности, с помощью математических методов наподобие преобразования Фурье.

С целью более подробного обоснования указанного свойства, состоящего в высокой вероятности значительного уменьшения эффективной амплитуды рассматриваемых мелкомасштабных вариаций экспериментальной плотности вероятности (применительно к ее дискретной форме) при существовании в (1) независимого случайного процесса $x_2(t)$, для каждого отрезка реализации разобьем область значений измеряемой случайной величины x на N интервалов равной ширины h :

$$x_{\min} + mh \leq x < x_{\min} + (m+1)h, \quad 0 \leq m \leq N-1, \quad (3)$$

где $0 \leq m \leq N-1$ и m номер ячейки разбиения области значений случайной величины x .

В (3) слагаемое x_{\min} равно минимуму $x(t)$ на соответствующем отрезке реализации.

Если на всем выбранном отрезке реализации в (1) отсутствует слагаемое $x_2(t)$, то вероятность $Q(m)$ попадания измеренных значений $x(t) = x_1(t)$ в m -ю ячейку вида (3) может быть записана в виде $Q(m) = q_1(m) + q_2(m)$. Здесь $q_1(m)$ – неизвестная “истинная” вероятность данного события, которая соответствует бесконечно большому объему измерений, а $q_2(m)$ – случайное отклонение от $q_1(m)$, связанное с ошибками измерения и ограниченным количеством отсчетов. Полагаем, что в общем случае зависимость $q_1(m)$ является детерминированной функцией от дискретной переменной m , и масштаб ее изменения Δ_{q_1} есть величина порядка $N \gg 1$, см. (3). В то же время последовательность $q_2(m)$ является случайной и с

высокой вероятностью может сильно флуктуировать и менять знак даже при изменении значения m на единицу. Другими словами, именно слагаемое $q_2(m)$ определяет свойства мелкомасштабных флуктуаций вероятностного распределения $P(m)$.

Если процесс $x_2(t)$ существует на данном отрезке реализации, то для вероятности $S(m)$ попадания результатов измерений в ячейку номер m распределения (3) получаем

$$S(m) = \sum_{i=0}^{N-1} Q(i)W(i,m) = s_1(m) + s_2(m), \quad (4)$$

$$s_1(m) = \sum_{i=0}^{N-1} q_1(i)W(i,m), \quad s_2(m) = \sum_{i=0}^{N-1} q_2(i)W(i,m).$$

Здесь $W(i,m)$ – вероятность попадания значения $x(t)$ в ячейку (3) номер m при условии, что значение $x_1(t)$ оказалось в ячейке номер i и $x_2(t) \neq 0$. (При отсутствии $x_2(t)$ на этом отрезке реализации $W(i,m) = \delta_{i,m}$, где $\delta_{i,m}$ – символ Кронекера, и $S(m) = Q(m)$.) Горизонтальный масштаб ΔW зависимости $W(i,m)$ как функции от дискретного аргумента i , определяемый средним квадратичным отклонением σ_2 случайной величины x_2 для данного отрезка реализации, может быть оценен снизу как $\Delta W \sim 2\sigma_2 h^{-1}$. Здесь учтено, что по условию процесс $x_2(t)$ не зависит от $x_1(t)$ и, следовательно, параметры $\langle x_2 \rangle$ и σ_2 не зависят от номера i ячейки распределения (3), в которой оказалось значение $x_1(t)$. С учетом условия нормировки получаем, что $\text{Max}\{W(i,m)\} \sim \Delta W^{-1}$.

Полагаем, что этот масштаб является малым по сравнению с эффективной шириной зависимости $q_1(i)$ (в обратном случае задача об установлении существования в (1) случайного слагаемого $x_2(t)$ не представляет сложности). Тогда с учетом неотрицательности $q_1(i)$ и $W(i,m)$ зависимость $s_1(m)$ можем считать столь же медленно (т.е. с горизонтальным масштабом $\Delta_{q_1} \sim N \gg 1$) изменяющейся при изменении m на единицу, как и $q_1(m)$.

Отметим, что интервал дискретности h в (3) всегда можем задать столь малым, что будет выполняться условие

$$\sigma_2 \geq (2-3)h. \quad (5)$$

Кроме того, как указано выше, случайную последовательность $q_2(m)$ правомерно полагать некопеременной. Это связано с тем, что знак отклонения от неизвестной “истинной” (то есть отве-

чающей бесконечному числу отсчетов) величины $q_1(m)$ для количества значений случайного процесса $x(t)$, попавших в m -ю ячейку в (3), в общем случае слабо зависит от ее номера. Другими словами, имеет место очевидный факт, что измеренные значения экспериментальной плотности вероятности в каждой из ячеек разбиения (3) могут отклоняться в любую сторону от неизвестного “истинного” вероятностного распределения. И, следовательно, в каждой ячейке номер m с высокой вероятностью такие отклонения могут быть любого знака.

Так как при всех m величину $s_2(m)$ в (4) можем рассматривать как усреднение $q_2(i)$ по совокупности неотрицательных вероятностных коэффициентов $W(i, m)$, то при выполнении (5) и с учетом указанной знакопеременности множителя $q_2(i)$ эффективная амплитуда слагаемого $s_2(m)$ с высокой вероятностью должна стать существенно меньше по сравнению с амплитудой для $q_2(m)$. Действительно, в данном случае получаем:

$$\begin{aligned} |s_2(m)| &= \left| \sum_{i=0}^{N-1} q_2(i) W(i, m) \right| \ll \\ &\ll \sum_{i=0}^{N-1} |q_2(i)| W(i, m) \leq \text{Max} |q_2(i)| \Delta W^{-1}. \end{aligned}$$

При выводе присутствующего здесь двойного неравенства учтено, что ошибки определения значений дискретной плотности вероятности, вызывающие появление слагаемого $q_2(i)$ и связанные с ограниченным числом отсчетов для одного отрезка реализации, для всех ячеек (3) с номерами $i \in [0, N-1]$ можем полагать независимыми. Поэтому с высокой вероятностью количество положительных и отрицательных значений $q_2(i)$ будут мало отличаться, откуда и следует указанное неравенство. (Его можно понимать как выполняющееся “в среднем”, то есть справедливое для большинства отрезков реализации и реализующееся при проведении усреднения по большому числу таких отрезков).

Учтем также, что при выполнении (5), значение ΔW^{-1} можем считать величиной, которая является малой (или как минимум в несколько раз меньшей) по сравнению с единицей. В итоге получаем, что максимальное (по всем возможным m) значение $|s_2(m)|$ с высокой вероятностью окажется значительно меньше, чем аналогичная величина для $|q_2(m)|$. Это означает, что при введенных условиях будет иметь место существенное уменьшение для эффективной амплитуды мелкомасштабных флуктуаций дискретной функции $S(m)$ по сравнению с аналогичной амплитудой для $Q(m)$.

Подчеркнем, что в рамках предлагаемой методики важную роль играет требование независимости случайных величин x_1 и x_2 , согласно которому получаем $W(i, m) = W(i - m)$. Это означает, что если $x_2(t) \neq 0$, а слагаемое $x_1(t)$ из суммы (1) находится в ячейке (3) номер i , то вероятность $S(m)$ того, что в итоге измеренное значение $x(t)$ окажется в ячейке номер m , зависит только от разности номеров двух этих ячеек. (В случае полной симметричности данного распределения $W(i - m) = W(|i - m|)$.)

Переход от $W(j, m)$ к $W(j - m)$ является принципиальным, поскольку для всех возможных номеров m он обеспечивает равномерность эффекта рассматриваемого усреднения и связанного с ним уменьшения уровня случайных мелкомасштабных флуктуаций вероятностного распределения $S(m)$ при существовании независимого случайного процесса $x_2(t)$ на соответствующем отрезке реализации. Подобная равномерность является необходимой, поскольку при ее отсутствии степень указанного усреднения может отличаться для разных ячеек в (3). В таком случае в (4) возможно, например, сохранение уровня сильных мелкомасштабных флуктуаций $s_2(m)$ (и, следовательно, $S(m)$) на одном или нескольких интервалах таких ячеек.

В итоге можем утверждать, что появление в (1) случайного слагаемого $x_2(t)$, независимого или слабо зависимого от фонового шума $x_1(t)$, при справедливости (5) с высокой вероятностью приводит к уменьшению (по сравнению с отсутствием данного случайного процесса на всем отрезке реализации) модуля разности вероятностей вида $P(m+1) - P(m)$, $0 \leq m \leq N-2$. Этот вывод справедлив и применительно к сумме вида $\sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m P_m$ для одного отрезка реализации, а также для среднего значения подобных сумм по локальной совокупности таких отрезков. (Заметим, что указанную сумму можно рассматривать как частный случай ряда Фурье вида $\sum_{m=0}^{N-1} \exp(ipm) P_m$ при значении аргумента $p = \pi$; область $p \sim \pi$ отвечает исследованию мелкомасштабных флуктуаций случайной последовательности P_m). В данной статье этот факт будет использован при анализе влияния процессов подготовки приближающихся землетрясений на изменение статистики измерений рассматриваемого далее физического поля.

Далее с целью дополнительного усиления обобщаемого статистического феномена вместо $x(t)$ перейдем к рассмотрению некоторой зависимости $\mathcal{F}[x(t)]$, обладающей интегрируемыми

особенностями плотности вероятности случайной величины $\mathcal{F}[x]$. Из проведенных вычислений следует, что их влияние приведет к усилению различия (вблизи точек указанных особенностей) величины эффективной амплитуды рассматриваемых мелкомасштабных флуктуаций для тех отрезков реализации, для которых существует независимое слагаемое $x_2(t)$ по сравнению с отрезками, для которых оно тождественно отсутствует.

В результате мы приходим к выводу, что появление в (1) слагаемого $x_2(t)$, связанного с подготовкой надвигающегося землетрясения, со статистически значимой вероятностью способно привести к существенному изменению величины и в целом свойств функционала вида

$$L(n) = \frac{A}{M} \sum_{l=n-M+1}^n |\mathcal{L}_l|, \quad \mathcal{L}_l = \sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m P_{m,l}. \quad (6)$$

В (6) l – номер отрезка реализации, множитель A введен с целью перехода к удобной для анализа области значений данного функционала, M – ширина интервала усреднения по последовательным отрезкам реализации, аргумент n отвечает моменту времени завершения отрезка реализации с этим номером, а коэффициенты $P_{m,l}$ есть вероятности попадания значений случайной величины $F[x(t)]$ в ячейку номер m , см. (3). Подчеркнем, что такое изменение будет иметь место при выполнении условия (5). Это означает, что амплитуда процесса $x_2(t)$ должна существенно превышать ширину h интервала дискретизации в (3). Вероятность такого превышения значительно возрастает при увеличении магнитуды приближающегося события или при географической близости точки его эпицентра к применяемому магнетометру и уменьшается в обратном случае. При дальнейших вычислениях, в частности, будет эмпирически проведена проверка эффективности использования функционала (6) как индикатора приближения моментов времени начала сейсмических событий.

Отметим также, что с математической точки зрения принцип действия предлагаемой методики состоит в оценке степени равномерности вероятностного распределения на малых интервалах области значений измеряемого сигнала. Это означает, что статистический функционал (6) характеризует уровень хаоса и, следовательно, величину энтропии для измеряемого физического поля. Увеличение и, наоборот, сжатие эффективной области значений случайного процесса $x_2(t)$ с высокой вероятностью приводит к уменьшению и, соответственно, увеличению значений функционала (6). Другими словами, при увеличении сдвигания литосферных плит на этапе “итоговой подготовки” приближающегося землетрясе-

ния будет иметь место уменьшение, а при локальном ослаблении таких процессов – увеличение значений функционала $L(n)$.

Стандартный комплект оборудования на магнитных обсерваториях, в том числе VOX и GLK, включает в себя следующие приборы: скалярный магнитометр для измерения полной величины модуля магнитного поля Земли; векторный магнитометр для измерения вариаций компонент вектора магнитного поля Земли; феррозондовый магнитометр на немагнитном теодолите (деклинометр/инклинометр), предназначенный для абсолютных измерений магнитного склонения и наклона; система автоматического сбора и регистрации магнитных данных. На магнитных обсерваториях сегмента ИНТЕРМАГНЕТ используются скалярные протонные магнитометры, которые измеряют величину модуля магнитного поля Земли с разрешающей способностью 0.01 нТл. Векторный магнитометр, в зависимости от ориентации на географический либо магнитный север, регистрирует компоненты X, Y, Z либо H, D, Z соответственно. Используются в основном цифровые векторные магнитометры DTU Space FGE и MAGDAS-GOLD. Из отечественных приборов распространение получили векторные магнитометры, разработанные в ИЗМИРАН. Типичный векторный феррозондовый магнитометр имеет разрешение до 0.1 нТл. Феррозондовые магнитометры на немагнитном теодолите для проведения абсолютных измерений на магнитных обсерваториях сегмента ИНТЕРМАГНЕТ представлены магнитометрами MinGeo на теодолитах Theo 010 и Theo 020. Основные принципы измерения изложены в [Jankowski, Sucksdorf, 1996; Newit et al., 1996].

В виде случайного процесса $x(t)$ в данной работе рассматривается совокупность измерений X -, Y - и Z -компонент геомагнитного поля. Эти измерения были проведены в период с 1 по 15 февраля 2022 г. на магнитовариационной станции VOX геофизического полигона Борок (Институт физики Земли РАН), расположенной на севере Ярославской области, а также с помощью магнитометра GLK, находящегося на территории Армении. Координаты местонахождения магнитометра GLK почти совпадали с координатами эпицентра рассматриваемого землетрясения.

Далее в статье проводится анализ свойств зависимости $L(n)$ при $A = 1000$ и $M = 100$ и $\mathcal{F}(x) = \sin(x)$ (см. [Volvach et al., 2022a, b, c, d, e], Kogan et al., 2021]). Это связано с тем, что плотность вероятности статистики, отвечающей $\sin[x]$, обладает интегрируемой особенностью вида $(1 - w^2)^{-0.5}$, которая усиливает (с учетом рассмотренного выше усреднения) различие между вероятностными распределениями при суще-

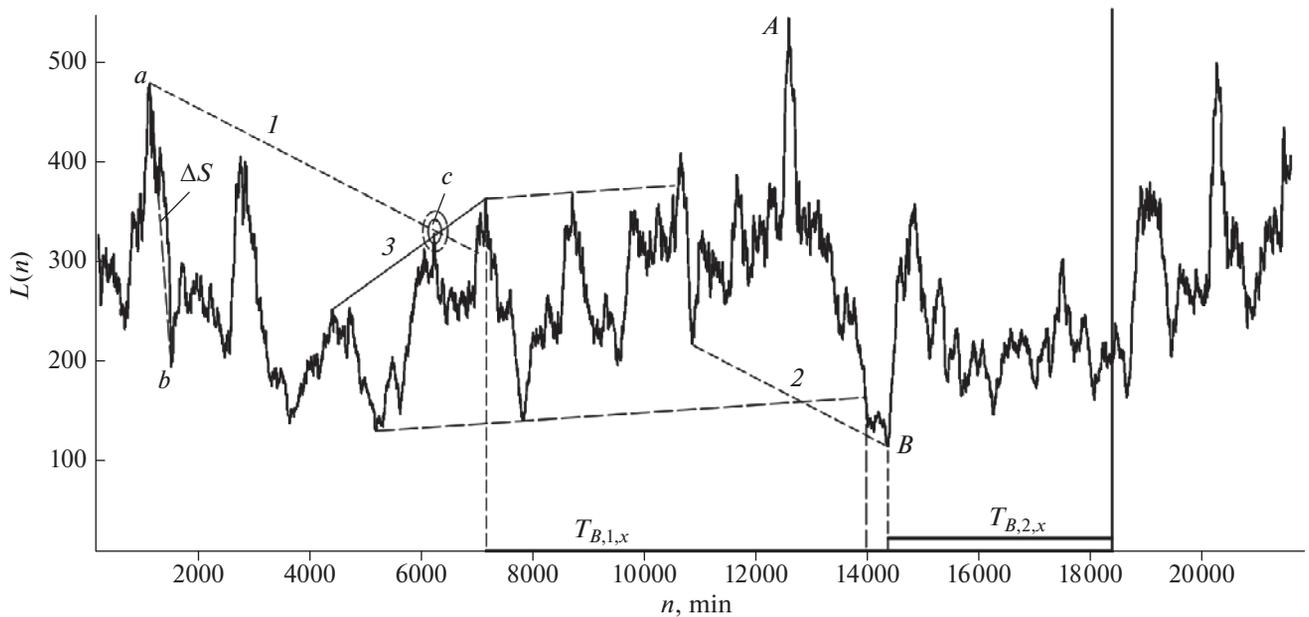


Рис. 2. Зависимость $L(n)$, соответствующая измерениям X -компоненты геомагнитного поля на магнитометре Борок.

ствовании и при отсутствии случайного процесса $x_2(t)$ на соответствующем отрезке реализации.

Как и в указанных работах, при переходе к рассмотрению статистики случайной величины $\sin(x)$ коэффициент $P_{m,l}$ в формуле (6), по аналогии с (3), обозначает отвечающую отрезку реализации номер l вероятность попадания значений функции $\sin(x)$ в интервал номер m области значений вида

$$\begin{aligned} \sin[x(t)]_{\min} + mh &\leq \sin(x) < \\ &< \sin[x(t)]_{\min} + (m+1)h, \end{aligned} \quad (7)$$

$$0 \leq m \leq N-1.$$

В (7) множитель $h = 0.1$ есть ширина интервала дискретизации, определяющая их общее число $N = 2/h = 20$. Статистика (7) строится по совокупности измерений X -, Y - и Z -компонент измеряемого геомагнитного поля.

Введем несколько определений. Локальными трендами (ЛТ) будем именовать участки кривой $L(n)$, для которых выполняются указанные далее условия. (Примером локального тренда, в частности, является участок $a-b$ кривой $L(n)$ на рис. 2).

(а) Точки начала и завершения ЛТ (назовем их направляющими точками) отвечают экстремумам зависимости $L(n)$.

(б) Выполняется соотношение

$$L(n)_{\max} - L(n)_{\min} \geq 0.25\Delta L, \quad (8)$$

где $L(n)_{\max}$ и $L(n)_{\min}$ – максимум и минимум зависимости $L(n)$ в указанных точках границ ЛТ

(например, точки a и b на рис. 2), а ΔL , по аналогии с [Volvach et al., 2022a, b, c, d, e] – аналогичная разность максимума и минимума (точки A и соответственно B на рис. 2) значений функционала $L(n)$ на интервале от начала отсчета и до момента землетрясения (в данном случае значение ΔL оказывается тем же самым в пределах всей рассматриваемой на соответствующем рисунке области определения аргумента n).

(с) На декартовой плоскости $\{n, L(n)\}$ геометрическое отклонение Δs кривой $L(n)$ от отрезка прямой линии, соединяющей граничные точки и обладающего длиной Δl , удовлетворяет условию

$$\Delta s \leq 0.05\Delta l. \quad (9)$$

(выбор единиц геометрической длины осей абсцисс и ординат, влияющий на определение значений Δs и Δl , будет прокомментирован далее). Соотношение (9) является весьма жестким по сравнению с условиями, принятыми в с [Volvach et al., 2022a, b, c, d].

На рисунке 2 такой отрезок, изображенный удлиненным пунктиром, соединяет точки a и b границ локального тренда; здесь же показано указанное максимальное отклонение Δs .

(д) Для точки как начала, так и завершения ЛТ минимальное расстояние Δn_{\min} по горизонтали от кривой $L(n)$ должно удовлетворять неравенству

$$\Delta n_{\min} \geq 350 \text{ min}. \quad (10)$$

Условия (8)–(10) являются значительно более строгими по сравнению с использованными в

[Volvach et al., 2022a, b, c, d, e]. Они означают, что локальные тренды – это достаточно большие и квазипрямолинейные участки кривой $L(n)$, граничные точки которых являются экстремумами, которые существенно отдалены по горизонтали от других точек этой кривой.

Определим канал как пару квазипараллельных прямых, каждая из которых проведена через две соответствующие направляющие точки и угол $\Delta\alpha$ между направлениями которых удовлетворяет условию

$$\Delta\alpha \leq 1.4^\circ. \quad (11)$$

Значение $\Delta\alpha$ определяется с помощью метода скалярного произведения для векторов, проведенных на декартовой плоскости $\{n, L(n)\}$ через указанные пары направляющих точек, определяющих направление границ канала.

При этом горизонтальные координаты этих точек нормируются на длительность интервала в $n_e = 18386$ мин от начала рассматриваемых измерений (1.02.2022 в ноль часов ноль минут по UTC) и до момента землетрясения, а вертикальные – на максимум $\text{Max}\{L(n)\}$ зависимости $L(n)$ на том же промежутке времени. Значения Δs и Δl в (9) вычисляются при этих же условиях. Введение данной нормировки также является существенным ужесточением уровня строгости рассматриваемой методики по сравнению с [Volvach et al., 2022a, b, c, d, e; Вольвач и др., 2022] и необходимо для устранения возможного произвола (при определении значений $\Delta\alpha$, Δs и Δl), связанного с выбором единичного масштаба по осям абсцисс и ординат. Указанная нормировка эквивалентна переходу к проведению соответствующих расчетов при условии одинаковой геометрической длины интервалов $0 \leq n \leq n_e$ и $0 \leq \text{Max}\{L(n)\} \leq L(n)$ для соответствующих осей координат.

Также в порядке существенного ужесточения условий по сравнению с [Volvach et al., 2022a, b, c, d] будем рассматривать только те каналы, для которых хотя бы одна граница проходит либо через один из трех наиболее высоких максимумов, либо через один из трех самых глубоких минимумов рассматриваемой зависимости $L(n)$ на временном интервале до момента начала землетрясения. Введение данного ограничения связано со статистическим смыслом функционала $L(n)$, минимумы и максимумы которого с высокой вероятностью отвечают максимумам и соответственно минимумам “дополнительного” независимого случайного процесса $x_2(t)$, значения которого полагаем пропорциональными уровню сдавливания литосферных плит.

Кроме того, полагаем, что для любого канала отношение ζ большего и меньшего интервалов времени между парами точек, через которые проведены его границы, удовлетворяет условию

$$\zeta \leq 3. \quad (12)$$

(е) Рассмотрим определение тестирования, которое означает либо пересечение кривой $L(n)$ и рассматриваемой прямой линии (например, границы канала), либо (применительно к любой направляющей точке \mathcal{A} с координатами $\{n_t, L(n_t)\}$ и независимо от указанного пересечения или его отсутствия) взаимное прохождение этой прямой при $n = n_t$ на таком расстоянии ΔL_t по вертикали от данной точки \mathcal{A} , что коэффициент отклонения

$$\delta = \frac{\Delta L_t}{L(n_t)} \times 100\% \quad (13)$$

удовлетворяет условию $\delta \leq 1.2\%$.

Время последнего тестирования кривой $L(n)$ границ канала рассматривается как момент фиксации предвестника приближающегося землетрясения. Граница канала прерывается в точке ее пересечения с кривой $L(n)$ при нарушении (13).

(ф) Будем называть скользящей границей (СГ) прямую линию, которая проведена через две направляющие точки и при этом происходит тестирование этой прямой со стороны кривой $L(n)$ еще как минимум в одной направляющей точке (которую назовем дополнительной) при выполнении (13). Момент последнего тестирования СГ со стороны кривой $L(n)$ также полагаем временем выявления предвестника. Укажем, что далее при построении каналов и СГ применительно к совокупности точек кривой $L(n)$, для которых выполняется условие (13), будут учитываться только направляющие точки. Отметим, что для скользящих границ, изображенных на всех приведенных далее рисунках, коэффициенты отклонения δ в большинстве случаев оказываются существенно меньше 1% (см. (13)). Как и в случае границ канала, полагаем, что скользящая граница прерывается в точке ее пересечения с кривой $L(n)$ при нарушении (13).

Таким образом, как для границ каналов, так и для скользящих границ точкой последнего тестирования является либо точка пересечения с кривой $L(n)$ при нарушении условия (13), либо последняя направляющая точка, для которой (13) оказывается справедливым. Далее отдельно рассматриваются случаи, когда указанное последнее тестирование происходит перед рассматриваемым землетрясением, и когда оно имеет место уже после его завершения.

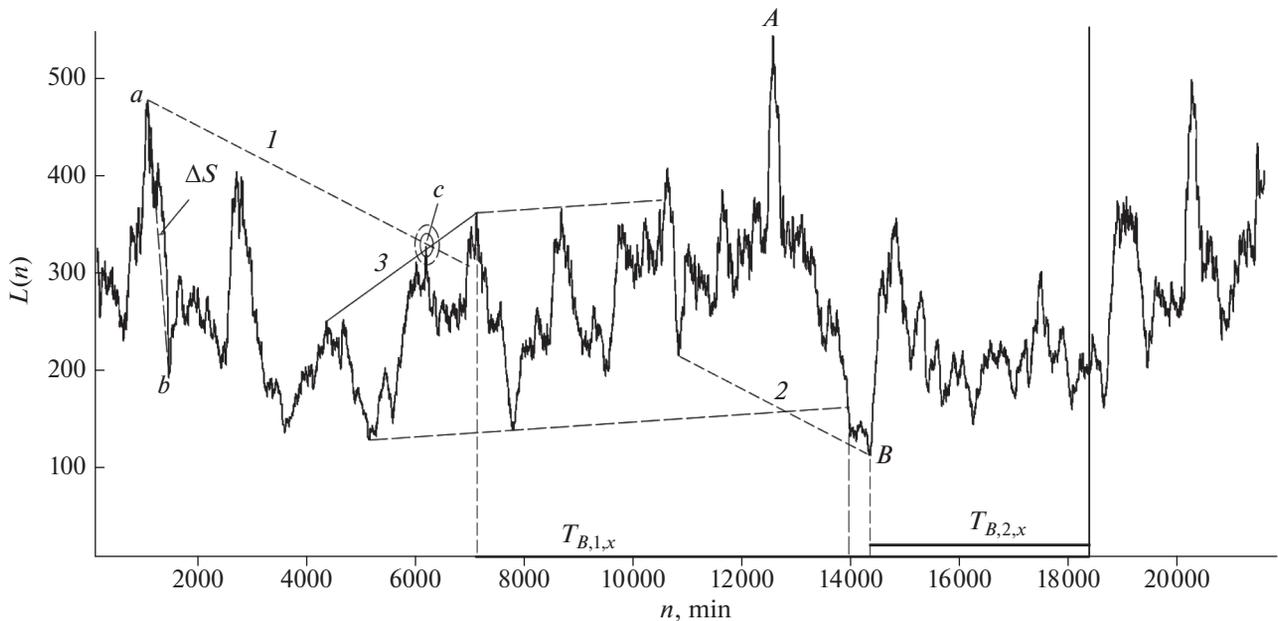


Рис. 3. Зависимость $L(n)$, соответствующая измерениям Y -компоненты геомагнитного поля на магнитометре Борок.

Считаем, что для любой СГ отношение наибольшего и наименьшего интервалов времени между любыми последовательными парами из трех указанных соседних направляющих точек (через две из которых эта прямая проведена, а третья является дополнительной), также должно удовлетворять (12). Другими словами, интервалы между указанными соседними направляющими точками должны быть взаимно соизмеримыми.

Как для каналов, так и для СГ, все связанные с ними направляющие точки должны взаимно отстоять по времени не меньше, чем на 100 мин. В обратном случае таким точкам сопоставляется одно тестирование. Более подробное теоретическое описание дано в [Volvach et al., 2022a].

Границы каналов будем изображать наклонными пунктирными прямыми, а скользящие границы — сплошными наклонными прямыми линиями.

Отметим, что возникновение перед сильными землетрясениями рассматриваемых в этой статье линейных структур в виде каналов и скользящих границ также подтверждается работами [Volvach et al., 2022a, b, c, d]. В них подобные линейные объекты зафиксированы в общей сложности перед 24 землетрясениями, не считая близких к ним по времени афтершоков. (Для всех без исключения рассмотренных авторами сейсмических событий, и в том числе не вошедших в указанные работы, не было ни одного, которому не предшествовало бы резкое усиление концентрации подобных феноменов применительно к измеряемым полям самой разной природы.) При этом

анализ и выявление предвестников проводились применительно к статистике измерений геомагнитного поля, критической частоты ионосферы и шумов сложной биологической системы. Поэтому даже при отсутствии на данный момент завершённой физической теории их появления, достоверность возникновения статистических феноменов подобного вида и резкого усиления их концентрации перед сейсмическими событиями является вполне доказанной.

Для всех приведенных далее рисунков ось абсцисс отвечает времени в минутах, отсчитываемых от момента 00:00 UTC 01 февраля 2022 г. и имеет период с 00:00 UTC 01.02.2022 г. по 23:59 UTC 15.02.2022 г.

На рисунках 2–7 сплошными наклонными прямыми обозначены скользящие границы, а парами квазипараллельных наклонных пунктирных прямых одного цвета — границы каналов. При этом сплошными эллипсами или окружностями выделены области дополнительных точек, а пунктирными эллипсами или окружностями отмечены критические точки (так будем называть граничные точки локальных трендов, через которые проходят или которые тестируют одновременно несколько границ каналов или скользящих границ). Эти точки могут совпадать: например, на рис. 2 точка c одновременно является и направляющей, и критической).

Вертикальные пунктирные прямые соответствуют времени фиксирования соответствующих предвестников. Момент рассматриваемого землетрясения на всех рисунках отмечен вертикаль-

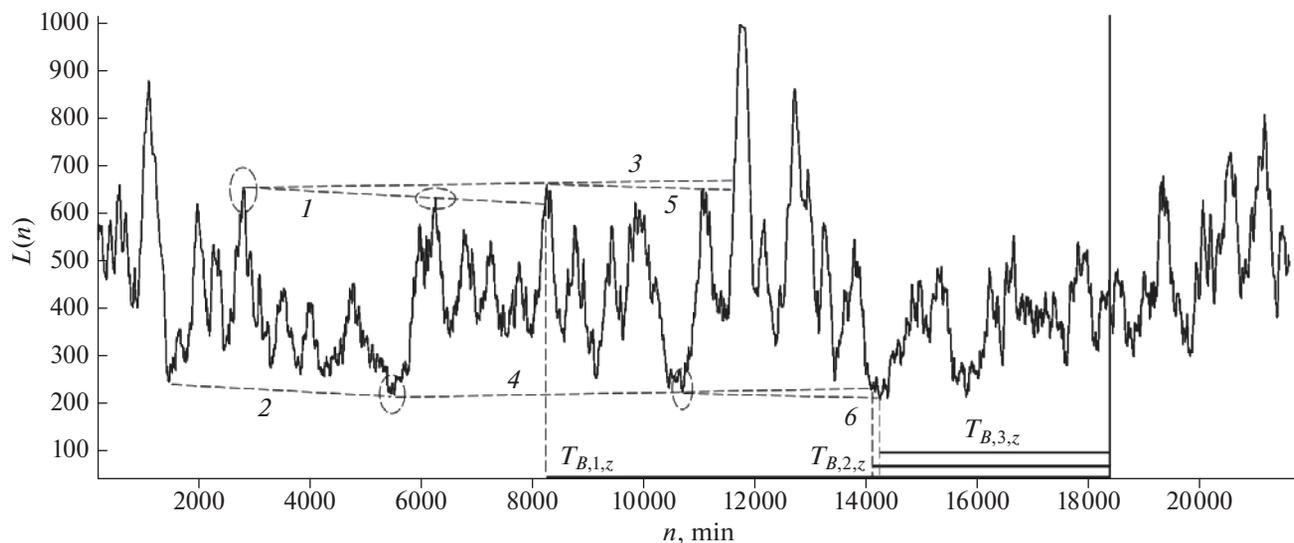


Рис. 4. Зависимость $L(n)$, соответствующая измерениям Z -компоненты геомагнитного поля на магнитометре Борок.

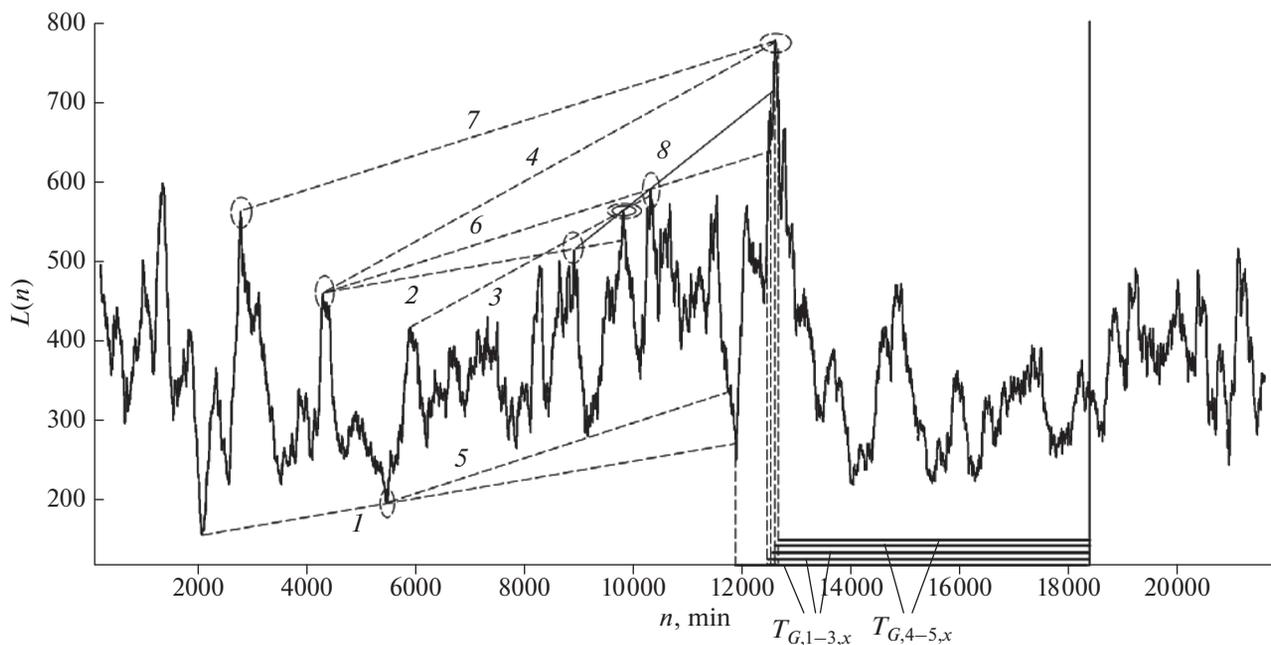


Рис. 5. Зависимость $L(n)$, соответствующая измерениям X -компоненты геомагнитного поля на магнитометре GLK.

ной сплошной красной прямой линией. В табл. 1 для X , Y и Z -компонент геомагнитного поля приведены значения интервалов времени T_X , T_Y и соответственно T_Z (в минутах) от момента регистрации предвестника и до начала землетрясения. На рис. 2–7 первая точка любого рисунка соответствует $n = M = 100 \text{ min}$.

Утолщенные зеленые и синие горизонтальные отрезки соответствуют интервалам времени T_X , T_Y и T_Z , а синие пунктирные подобные отрезки – промежуткам T'_X , T'_Y , и T'_Z .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ПРОВЕДЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Магнитовариационная станция ВОХ

На рисунках 2–4 приведена зависимость $L(n)$, соответствующая измерениям X -, Y - и Z -компонент геомагнитного поля на магнитометре ВОХ (полигон Борок) в период с 00:00 01.02.2022 по 23:59 UTC 15.02.2022. В этот период наиболее сильным и пространственно приближенным к расположению прибора событием в радиусе 2000 км

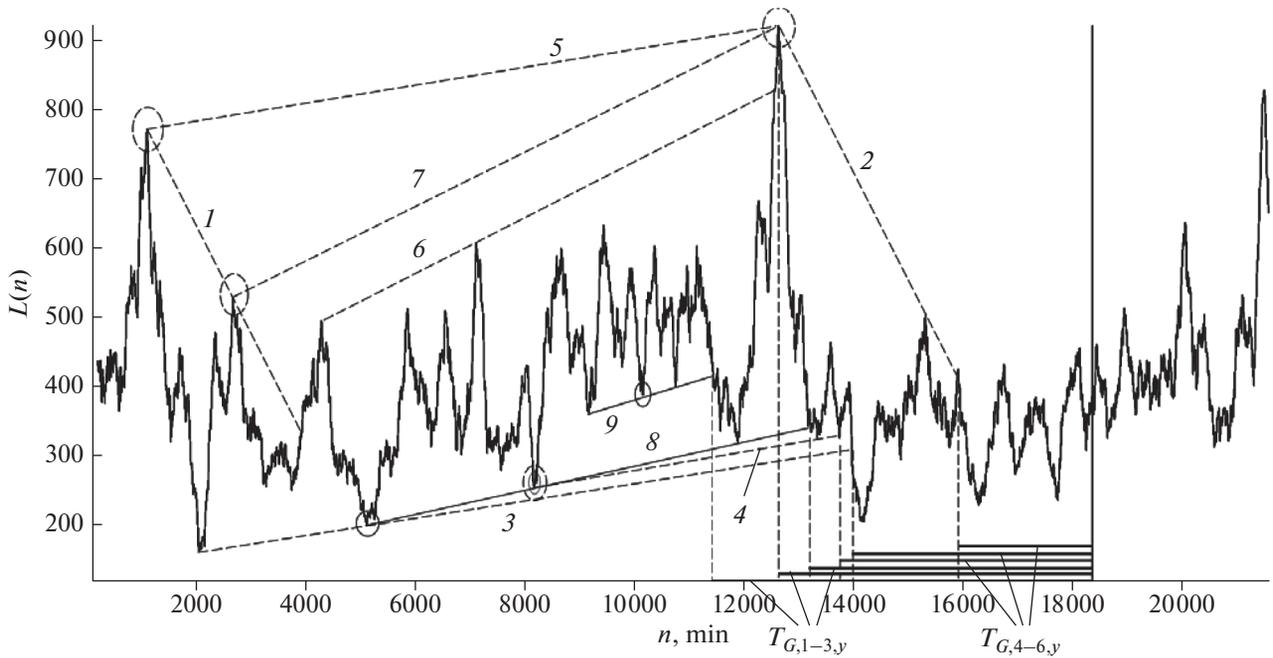


Рис. 6. Зависимость $L(n)$, соответствующая измерениям Y -компоненты геомагнитного поля на магнитометре GLK.

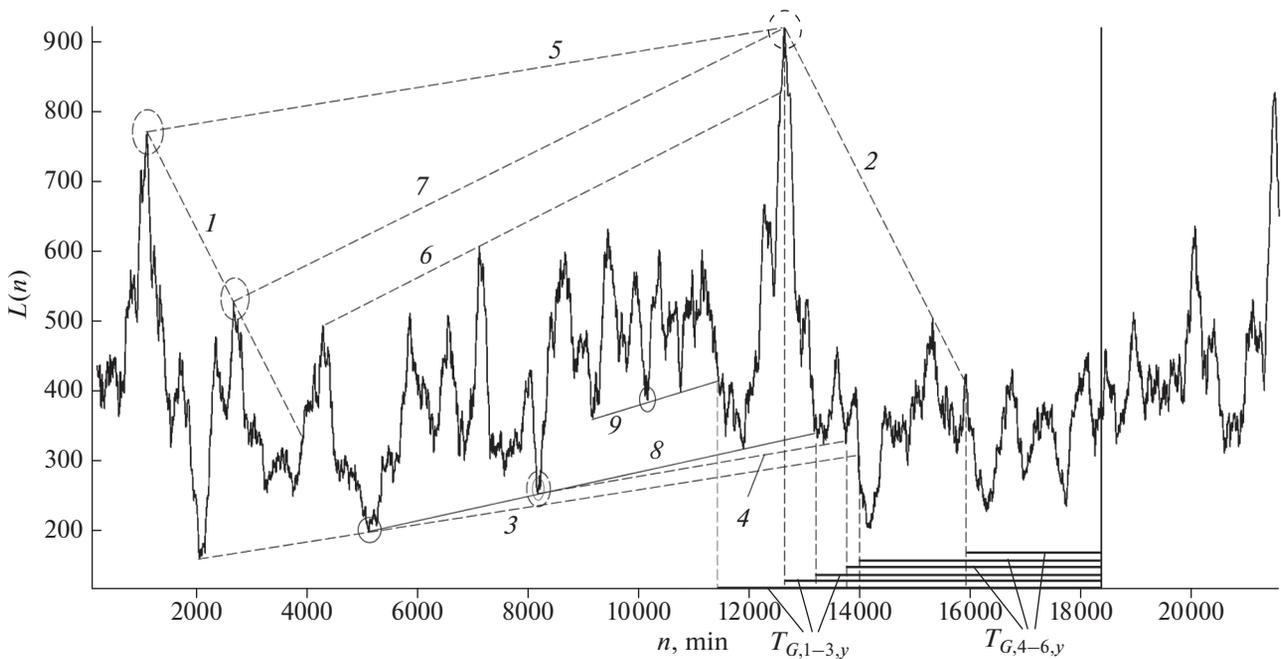


Рис. 7. Зависимость $L(n)$, соответствующая измерениям Z -компоненты геомагнитного поля на магнитометре GLK.

от точки расположения магнитометра оказалось рассматриваемое землетрясение.

На рисунке 2 приведена зависимость $L(n)$, соответствующая измерениям X -компоненты геомагнитного поля на магнитометре Борок в указанный период времени. Здесь и далее каждая точка

графика для рассматриваемого статистического функционала $L(n)$ соответствует усреднению по $M = 100$ отрезкам реализации для 120 измерений магнитного поля в каждом. Таким образом, любая точка кривой $L(n)$ отвечает 12000 измерениям соответствующей компоненты магнитного поля.

Таблица 1. Значения интервалов времени по измерениям магнитометров VOX и GLK

i	$T_{B,i,x}$, min	$T_{G,i,x}$, min	$T_{B,i,y}$, min	$T_{G,i,y}$, min	$T_{B,i,z}$, min	$T_{G,i,z}$, min
1	11 230	6512	874	6968	10 151	14970
2	4442	5908	—	5738	4312	6110
3	—	5831	—	5185	3682	4817
4	—	5788	—	4624	—	4814
5	—	5788	—	4397	—	945
6	—	—	—	2474	—	12
7	—	—	—	—	—	128

Примечание. Значения интервалов времени $T_{B,i,x}$, $T_{B,i,y}$ и $T_{B,i,z}$ по измерениям магнитометра VOX и $T_{G,i,x}$, $T_{G,i,y}$ и $T_{G,i,z}$ по данным магнитометра GLK от момента регистрации предвестника и до начала землетрясения. Интервалы времени, соответствующие предвестникам, отвечающим измерениям магнитометра GLK в последние пять суток перед моментом начала землетрясения, выделены жирным. Аналогичные промежутки времени для магнитометра VOX отмечены обычным шрифтом.

Для канала 1–2 угол между направлениями его границ $\Delta\alpha_{1-2} = 0.003^\circ$ удовлетворяет (11). Для интервала $T_{B,1,x}$ точка его начала соответствует моменту последнего тестирования кривой $L(n)$ линии СГ 3, а для промежутка $T_{B,2,x}$ такая точка отвечает времени последнего тестирования для границ канала 1–2. Значения $T_{B,1,x}$ и $T_{B,2,x}$ приведены в табл. 1.

На рисунке 3 изображен вид функционала $L(n)$ для измерений Y -компоненты геомагнитного поля на магнитометре Борок в период с 00:00 UTC 01.02.2022 по 23:59 UTC 15.02.2022. Интервал $T_{B,1,y}$ отвечает точке последнего тестирования кривой $L(n)$ для канала 1–2; значение данного промежутка времени приведено в табл. 1. Угол между направлениями границ данного канала составляет $\Delta\alpha_{1-2} = 0.14^\circ$ и удовлетворяет (11).

На рисунке 4 приведена зависимость $L(n)$, соответствующая измерениям Z -компоненты геомагнитного поля на магнитометре Борок в период с 00:00 UTC 01.02.2022 по 23:59 UTC 15.02.2022. Промежутки времени $T_{B,1-3,z}$, приведенные в таблице, определяются моментами последнего тестирования кривой $L(n)$ границ каналов 1–2, 3–4 и соответственно 5–6 (им отвечают углы между направлениями границ $\Delta\alpha_{1-2} = 0.86^\circ$, $\Delta\alpha_{2-3} = 0.33^\circ$ и $\Delta\alpha_{5-6} = 0.55^\circ$ значения которых удовлетворяют (11)).

3.2. Магнитовариационная станция GLK – обнаружение предвестников землетрясения по статистике измерений X , Y и Z -компонент геомагнитного поля

На рисунке 5 приведена зависимость $L(n)$ для измерений X -компоненты магнитного поля, проведенных в период с 00:00 UTC 01.02.2022 по 23:59 UTC 15.02.2022. магнитовариационной станцией GLK. Интервалы $T_{G,1-2,x}$ и $T_{G,4-5,x}$ соответствуют точкам последнего тестирования для

каналов 1–2, 5–6, 3–4 и 6–7, а промежутков $T_{G,3,x}$ – для аналогичной точки применительно к скользящей границе 8. Длительности этих промежутков времени приведены в таблице. Для интервалов $T_{G,2-5,x}$ отвечающие им вертикальные пунктирные прямые на рис. 5 существенно разрежены по оси абсцисс с целью избежать их полного слияния. Углы расхождения границ для показанных на данном рисунке каналов составляют $\Delta\alpha_{1-2} = 0.13^\circ$, $\Delta\alpha_{3-4} = 0.47^\circ$, $\Delta\alpha_{5-6} = 0.87^\circ$, $\Delta\alpha_{6-7} = 0.20^\circ$.

На рисунке 6 приведена зависимость $L(n)$ для измерений Y -компоненты магнитного поля, проведенной в период с 00:00 UTC 01.02.2022 по 23:59 UTC 15.02.2022 магнитовариационной станцией GLK. Интервалам $T_{G,1,y}$ и $T_{G,3,y}$ соответствуют моменты последнего тестирования для скользящих границ 9 и 8, а промежуткам времени $T_{G,2,y}$ и $T_{G,3-6,y}$ – аналогичные точки для каналов 6–7, 4–5, 3–4 и 1–2. Углы расхождения границ для этих каналов составляют $\Delta\alpha_{1-2} = 0.19^\circ$, $\Delta\alpha_{3-4} = 1.14^\circ$, $\Delta\alpha_{4-5} = 0.61^\circ$, $\Delta\alpha_{6-7} = 0.07^\circ$.

На рисунке 7 приведена зависимость $L(n)$ для измерений Z -компоненты магнитного поля, проведенной в период с 00:00 UTC 01.02.2022 по 23:59 UTC 15.02.2022 магнитовариационной станцией GLK. Интервалам $T_{G,1,z}$, $T_{G,3-4,z}$ и $T_{G,6-7,z}$, соответствуют точки последнего тестирования каналов 3–4, 6–7, 1–2, 8–9 и 4–5, а промежуткам $T_{G,2,z}$ и $T_{G,4,z}$ – аналогичные точки для скользящих границ 10 и 11. Для интервалов $T_{G,3-5,z}$ соответствующие им вертикальные пунктирные прямые существенно разрежены по оси абсцисс с целью большей наглядности рисунка. Углы между границами указанных каналов принимают значения $\Delta\alpha_{1-2} = 0.19^\circ$, $\Delta\alpha_{3-4} = 0.03^\circ$, $\Delta\alpha_{4-5} = 0.71^\circ$, $\Delta\alpha_{6-7} = 0.41^\circ$, $\Delta\alpha_{8-9} = 0.74^\circ$. Значения интерва-

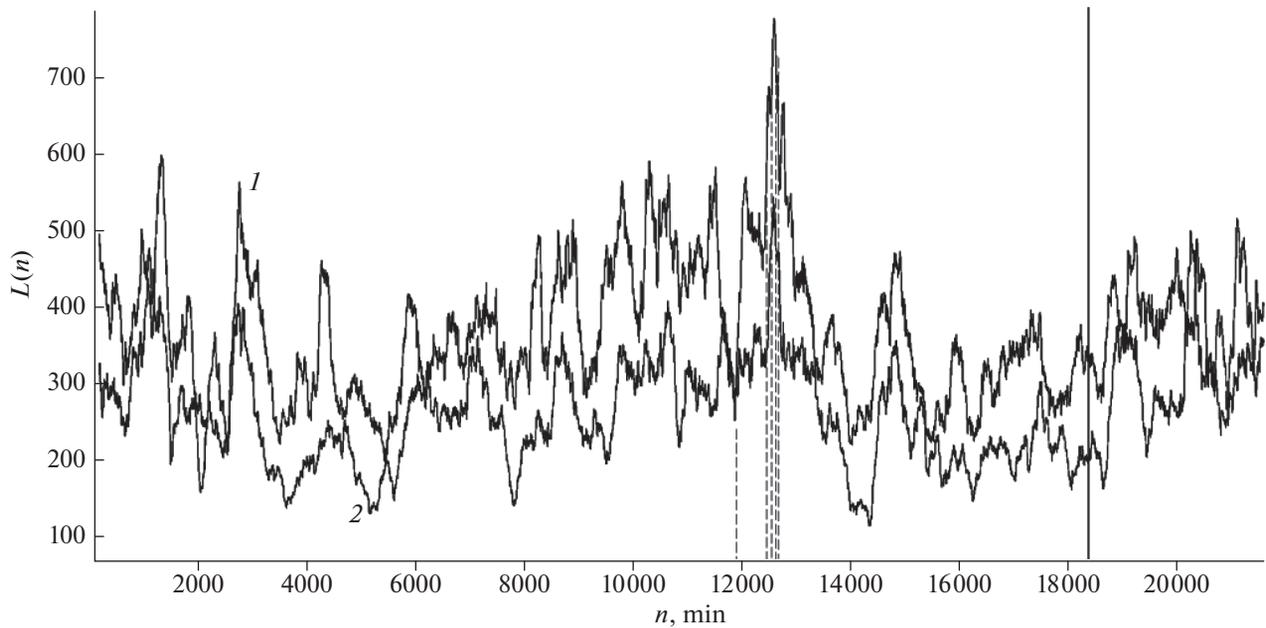


Рис. 8. Сопоставление зависимостей $L(n)$, соответствующих измерениям X -компоненты геомагнитного поля на магнитометре GLK (кривая 1) и Борок (кривая 2).

лов $T_{G,1-7,z}$ от времени регистрации предвестника до момента землетрясения приведены в табл. 1.

С целью непосредственного сопоставления влияния процесса подготовки рассматриваемого землетрясения на свойства статистики магнитного поля в регионе Закавказья и в центре Русской плиты на рис. 8 совместно приведены те же, что и на рис. 2 и соответственно 5, зависимости $L(n)$ для измерений X -компоненты магнитного поля по данным магнетометров BOX (светло-коричневая кривая 1) и GLK (кривая 2; с целью большей контрастности рисунка, в отличие от рис. 2 она изображена синим цветом). Топологическое подобие двух данных кривых повторяется и применительно Y - и Z -компонентам магнитного поля, см. рис. 3 и 5 и соответственно 4 и 7. Точно также имеет место взаимное топологическое подобие всех трех кривых $L(n)$, изображенных на рис. 2–4 и относящихся к данным магнетометра BOX, и этот же феномен имеет место для кривых $L(n)$, приведенных на 5–7 и отвечающих измерениям GLK. Соответствующие рисунки не приведены с учетом ограничения объема данной публикации.

Отметим, что при построении каналов применялись условия, обеспечивающие малую вероятность случайного (то есть не связанного с физическими процессами) возникновения квазипараллельности их границ с выполнением соотношения (11) [Volvach et al., 2022a]. В рассматриваемом случае эти условия сводились либо к существованию еще одного канала, граница которого была бы квазипараллельна границе дан-

ного канала при выполнении (11), либо прохождением хотя бы одной границы канала через критическую точку (последнее условие является дополнением к указанной работе). Невыполнение этих условий в случае рис. 3 связано с чрезвычайно жесткими ограничениями, которые были осознанно введены авторами с целью демонстрации устойчивости предлагаемого подхода. Поэтому канал 1–2 на рис. 3 и связанный с ним интервал $T_{B,1,y}$ также, в целях объективности, включены в число рассматриваемых объектов.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании проведенных расчетов получаем следующие основные отличия свойств измерений двух указанных магнитовариационных станций.

1. По результатам измерений магнетометра геофизической станции BOX полигона Борок, расположенного в Ярославской области (то есть фактически в центре сейсмически спокойной Русской плиты) на временном интервале с 00:00 UTC 10.02.2022 по 18:25 UTC 13.02.2022 было зарегистрировано 6 определенных выше предвестников, предшествующих землетрясению магнитудой 5.3 (Metsavan, Armenia, 2022-02-13, 18:25:56 UTC). В то же время для магнитовариационной станции GLK, расположенной в Армении в непосредственной близости от эпицентра данного события, число таких предвестников оказалось равно 18, см. таблицу 1.

2. Согласно данным каталога USGS, других событий с соизмеримым выбросом сейсмической энергии в области радиусом 2000 км от полигона Борок в указанный период времени не было отмечено. В относительной близости к магнетометру GLK на данном временном интервале произошло одно землетрясение такой же магнитуды 5.3 (02.02.2022, 21:03:48 UTC, вблизи о. Кипр, на удалении порядка 1300 км от расположения GLK) и одно сейсмическое событие магнитуды 5.8 на расстоянии порядка 2800 км от этого же магнетометра (04:16:01 UTC 05.02.2022; восточный Афганистан). Начиная с 6 февраля 2022 года и вплоть до момента начала рассматриваемого землетрясения, наиболее близкое событие соизмеримой или большей магнитуды имело место на удалении порядка 7000 км. Поэтому отмеченное в статье различие числа предвестников, зафиксированных по данным двух этих магнетометров, с высокой вероятностью может быть объяснено очень большим отличием расстояний от точки эпицентра рассматриваемого события до станций GLK.

3. Более того, как следует из анализа данных таблицы 1, в последние 5 сут перед моментом начала рассматриваемого в статье события, имело место 17 предвестников для магнетометра GLK против 4 подобных феноменов, отвечающих данным измерений на полигоне Борок.

4. Следовательно, можем утверждать, что в сейсмически активном регионе эффект интенсивного появления рассматриваемых графических феноменов в виде пяти- и соответственно четырехкратного тестирования кривой $L(n)$ границ каналов и линий скользящих границ, ранее выявленный в [Volvach et al., 2022a, b, c, d; Вольвач и др., 2022], проявляется с многократно большей интенсивностью по сравнению с удаленными от точки эпицентра географическими районами. Это означает дополнительную верификацию предложенной в указанных работах методики определения предвестников приближающихся сейсмических событий. Таким образом, возникновение на интервале от порядка 5 суток перед началом землетрясения большого числа линейных графических объектов, рассматриваемых в данной статье, с достаточно высокой вероятностью может указывать на приближение землетрясения в соответствующем сейсмоактивном регионе.

5. При анализе данных магнетометров GLK и ВОХ были выявлены 17 и соответственно 5 критических точек (они выделены пунктирными эллипсами или окружностями). Напомним, что этим термином названы точки кривой $L(n)$, через которые на декартовой плоскости одновременно проходят несколько разных каналов и скользящих границ. Как следует из результатов [Volvach et al., 2022a, b, c, d; Вольвач и др., 2022], любое возникновение канала или скользящей границы

с высокой вероятностью оказывается связано с возникновением предвестника землетрясения и, следовательно, является индикатором существенных изменений, происходящих в зоне его подготовки. Одновременное сочетание нескольких таких изменений, отвечающее любой критической точке, может быть интерпретировано как момент существенного изменения сразу нескольких процессов подготовки приближающегося события и, следовательно, является важным признаком приближения времени его начала.

6. Следовательно, в несколько раз большее число критических точек для статистики данных магнетометра GLK по сравнению с измерениями на полигоне Борок может рассматриваться, во-первых, как эффективный предвестник приближающегося землетрясения, и во-вторых — как элемент верификации предлагаемого подхода.

7. На рисунках 5–7, отвечающих данным GLK, почти все каналы и скользящие границы проходят хотя бы через одну критическую точку. Это позволяет сделать вывод о высоком уровне взаимосвязи последовательности соответствующих процессов подготовки землетрясения при измерениях в сейсмоактивном регионе. Для рис. 2–4, которые соответствуют совокупности значений геомагнитного поля магнетометра ВОХ на полигоне Борок, подобная связность выражена существенно меньше. Следовательно, феномен значительного увеличения числа критических точек также с большой вероятностью является признаком “итогового этапа” подготовки землетрясения в соответствующем географическом районе.

8. Как видно из рис. 2–7, моменту начала рассматриваемого землетрясения предшествует возникновение вполне выраженного “провала” зависимости $L(n)$ из которого (на всех рисунка, кроме рис. 7) данная кривая начинает выходить через интервал времени порядка 30–35 ч после события. Такой феномен вполне отвечает развитой во Введении теории, согласно которой значения $L(n)$ должны уменьшаться при большом усилении процессов разлома литосферных плит, который полагаем статистически слабо зависимым от фонового шума (см. [Kogan, 2021]).

9. Авторы полагают, что рассматриваемые в статье линейные объекты в форме каналов и скользящих границ связаны со свойствами энтропии рассматриваемых процессов, которые проявляются в момент приближения резких изменений в состоянии соответствующей физической системы. Данное утверждение является предметом дальнейших исследований.

10. Различное время возникновения предвестников при анализе статистики разных компонент магнитного поля может объясняться разными амплитудами случайного процесса $x_2(t)$ для каждой из компонент магнитного поля, что

обусловлено анизотропией флуктуаций этого поля, вызываемых процессами в зоне подготовки сейсмического события. Указанное различие приводит к разной степени усреднения флуктуаций плотности вероятности фонового шума, которое проявляется в несовпадающем виде соответствующих кривых $L(n)$. При этом обращает на себя внимание концентрация предвестников на интервале 12 200–14 500 мин на рис. 5–7 для X -, Y - и Z -компонент магнитного поля для измерений GLK.

11. Из сопоставления с [Volvach et al., 2022a, b, c, d; Вольвач и др., 2022] следует вывод о значительном увеличении числа регистрируемых предвестников при рассмотрении более длительных интервалов времени, предшествующими соответствующему землетрясению. Этот эффект имеет место даже при очень сильном ужесточении критериев поиска исследуемых линейных объектов в виде каналов и скользящих границ. Подобный феномен может быть связано с тем, что на более длительном промежутке времени имеет место “завершение” пропорционально большего числа физических процессов (например, создание новых сетей разломов), совокупность которых и составляют процесс подготовки приближающегося сейсмического события. Реализация каждого такого процесса повышает общий уровень хаоса в системе, что приводит к выходу зависимости $L(n)$ за пределы ограничительных линий в виде каналов и скользящих границ.

12. Обладая магнитудой 5.3, рассматриваемое кавказское землетрясение относится к числу умеренных. Поэтому требует ответа вопрос о физической возможности регистрации предвестников в Ярославской области, где расположен магнитометр ВОХ. С целью ответа на него в статье приведен рис. 8, на котором совместно показаны обе зависимости $L(n)$ для X -компоненты магнитного поля, ранее приведенные на рис. 5 и 2, и построенные по данным магнитометров GLK (кривая 1) и соответственно GLK (кривая 2). (Кривая 1 изображена также, как на рис. 5, с сохранением пунктирных линий, которые на рис. 5 обозначают моменты регистрации предвестников, а зависимость 2, совпадающая с приведенной на рис. 2, для усиления контрастности выделена синим цветом).

Как несложно увидеть, на рис. 8 имеет место вполне выраженное топологическое подобие двух этих кривых. Такой результат означает высокий уровень связности и взаимозависимости статистики магнитного поля в двух рассматриваемых регионах. Следовательно, приходим к выводу о нелокальности процессов, связанных с подготовкой рассматриваемого землетрясения [Собисевич и др., 2013а, б]. Такого рода нелокальность может быть объяснена двумя способами. Первый из них сводится к формулировке гипотезы о рас-

пространении напряжения земной коры, возникающего в области гипоцентра готовящегося землетрясения, по системе разломов в западной части Евразии. Генерируемые при таком процессе возмущения магнитного поля имеют место как в области вблизи точки будущего эпицентра, так и на значительной части евро-азиатского и африканского регионов. Подобный феномен в результате приводит к корреляции уровней изменения хаоса в статистике измерений магнитного поля, проводимых обоими рассматриваемыми магнитометрами, что объясняет факт подобия топологии кривых 1 и 2 на рис. 8.

Согласно второй гипотезе, факт обсуждаемого подобия изначально связан с общим процессом возрастания напряжения по всей сети указанных разломов. Данный процесс может быть вызван явлениями, происходящими непосредственно в мантии и самом ядре Земли. С учетом ограниченности возможного объема этой статьи, изучение рассматриваемого феномена, общего для всех компонент магнитного поля, будет являться предметом дальнейших публикаций.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье было проведено сопоставление измерений геомагнитного поля по измерениям магнитовариационных станций Борок и GLK, расположенных соответственно в середине Русской плиты и в Армении. Исследуемые данные отвечали интервалу длиной в 15 суток, течение которого вблизи точки расположения магнитометра GLK имело место землетрясение магнитудой 5.3. Проведенный вероятностный анализ позволил выявить существенные отличия свойств статистики измерений для двух этих магнитометров на интервале времени перед указанным событием. Полученные результаты позволяют говорить о продвижении в решении задачи прогнозирования землетрясений, а также могут рассматриваться как дополнительная верификация предлагаемой методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Бабешко В.А., Селезнев М.Г.* Об одном методе исследования установившихся колебаний упругого полупространства, содержащего сферическую или горизонтальную цилиндрическую полость // Изв. АН СССР. Сер. ПММ. Вып. 1. Т. 47. С. 115–121. 1983.
- *Вольвач А.Е., Коган Л.П., Канониди К.Х.* Способ определения вероятности возникновения землетрясений на основе выявления феноменов с высоким уровнем детерминированности / Патент. 2778972 РФ, СПК G01V 1/008 (2022.08); G01V 3/38 (2022.08). № 2021122118: заявл. 26.07.2021; опубл. 29.08.2022. Бюл. № 25. 7 с. 2022.
- *Добровольский И.А.* Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 217 с. 1991.

- Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физмат, 236 с. 2009.
- Коган Л.П. Изменение статистических функционалов от критической частоты слоя f₂ ионосферы перед сильными землетрясениями // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 55. № 4. С. 525–539. 2015.
<https://doi.org/10.1134/S0016793215040064>
- Собисевич А.Л. Мониторинг слоистых неоднородных сред. Монография. М.: ОИФЗ РАН, 354 с. 2001.
- Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. М.: ФГБУН ИФЗ РАН, 512 с. 2012.
- Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Канониди К.Х. Аномальные геомагнитные возмущения в вариациях магнитного поля Земли на этапе подготовки и развития глубокофокусных землетрясений // Доклады академии наук. Геофизика. Т. 453. № 3. С. 329–333. 2013а.
- Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Канониди К.Х., Мисеюк О.И. Геомагнитные возмущения в вариациях магнитного поля Земли на этапах подготовки и развития турецкого (08.03.2010 г.) и северокавказского (19.01.2011 г.) землетрясений // Докл. АН. Геофизика. Т. 449. № 1. С. 93–96. 2013б.
- Чичинин И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн. М.: Недра, 220 с. 1984.
- Freund F. Earthquake Forewarning - A Multidisciplinary Challenge from the Ground up to Space // Acta Geophysica. V. 61. № 4. P. 775–807. 2013.
- Jankowski J., Sucksdorff C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 235 p. 1996.
- Kogan L.P., Bubukin I.T., Shtenberg V.B. To the question of calculating the probability of strong earthquakes in real time // Chaos, Solitons and Fractals. V. 145. 110807. 2021.
- Newitt L.R., Barton C.E., Bitterly J. Guide for magnetic repeat station surveys. International Association of Geomagnetism and Aeronomy Working Group V-8: Analysis of the Global and Regional Geomagnetic Field and its Secular Variation, 1996.
- Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H. et al. Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor // Communications in Non-linear Science and Numerical Simulation. V. 108. 106200. 2022a.
<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.106200>
- Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H. et al. Statistical precursors of a strong earthquake on April 6, 2009 on the Apennine Peninsula // Heliyon. V. 8. № 8. e10200. 2022b.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10200>
- Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H. et al. On the statistical precursors that preceded the earthquake of magnitude 6.0 on September 27, 2021, on the island of Crete // Arabian J. Geosciences. V. 15. 1358. 2022c.
<https://doi.org/10.1007/s12517-022-10656-8>
- Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H. et al. A Possible Relationship between the Sets of Quasi-Linear Local Trends Statistically Detected in the Variations of the Magnetic Field Parameters before Earthquakes in Seismically Active Zones of the Black Sea, Caucasus, and Western Asia // Geodynamics & Tectonophysics. V. 13. № 5. 0680. 2022d.
- Volvach A., Kogan L., Kanonidi K. et al. About statistical precursor earthquakes on October 12, 2021 with a magnitude of 6.4 on the Island of Crete // Romanian J. Physics. accepted. 2022e.