



A POSSIBLE RELATIONSHIP BETWEEN THE SETS OF QUASI-LINEAR LOCAL TRENDS STATISTICALLY DETECTED IN THE VARIATIONS OF THE MAGNETIC FIELD PARAMETERS BEFORE EARTHQUAKES IN SEISMICLY ACTIVE ZONES OF THE BLACK SEA, CAUCASUS, AND WESTERN ASIA

A.E. Volvach¹✉, L.P. Kogan², K.H. Kanonidi³, L.I. Nadezhka⁴, I.T. Bubukin⁵,
O.V. Boborikina⁶, V.B. Shtenberg², L.N. Volvach¹, D.T. Biazitov⁷

¹ Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, 1 Shuleykin St, Katsiveli 298688, Republic of Crimea, Russia

² Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65 Ilinskaya St, Nizhny Novgorod 603950, Russia

³ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Russian Academy of Sciences, 4 Kaluzhskoe Rte, Troitsk 108840, Russia

⁴ Voronezh State University, 1 University Sq, Voronezh 394018, Russia

⁵ Radiophysical Research Institute, Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 25-12a Bolshaya Pecherskaya St, Nizhny Novgorod 603950, Russia

⁶ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

⁷ Kazan Federal University, 18 Kremlyovskaya St, Kazan 420008, Republic of Tatarstan, Russia

ABSTRACT. The paper considers the properties of statistical function whose plot comprises a set of measurements of H-component of the magnetic field. There has been found a set of quasi-linear objects with very similar parameters. In the context of a hypothesis about the correspondence of these structures to seismic processes, there has been made an estimate of time intervals typical for the phases of decrease and increase in the level of compression of lithospheric plate material in the earthquake source zones. It has been shown that the application of statistical methods in geophysics may contribute to near real-time assessment of seismic hazard in the study area.

KEYWORDS: seismicity; recent movements; geomagnetic field; earthquake; prediction

RESEARCH ARTICLE

Received: December 14, 2021

Revised: April 28, 2022

Accepted: May 16, 2022

Correspondence: Alexandr E. Volvach, volvach@bk.ru

FOR CITATION: Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., Nadezhka L.I., Bubukin I.T., Boborikina O.V., Shtenberg V.B., L.N. Volvach., Biazitov D.T., 2022. A Possible Relationship between the Sets of Quasi-Linear Local Trends Statistically Detected in the Variations of the Magnetic Field Parameters before Earthquakes in Seismicly Active Zones of the Black Sea, Caucasus, and Western Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0680. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0680

О ВОЗМОЖНОЙ СВЯЗИ СОВОКУПНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИ ВЫЯВЛЯЕМЫХ КВАЗИЛИНЕЙНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ТРЕНДОВ В ВАРИАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ, КАВКАЗА И ЗАПАДНОЙ АЗИИ

А.Е. Вольвач¹, Л.П. Коган², К.Х. Канониди³, Л.И. Надежка⁴, И.Т. Бубукин⁵,
О.В. Боборыкина⁶, В.Б. Штенберг², Л.Н. Вольвач¹, Д.Т. Биазитов⁷

¹ Крымская астрофизическая обсерватория РАН, 298688, пгт Кацивели, ул. Шулейкина, 1, Республика Крым, Россия

² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, Россия

³ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 108840, Троицк, Калужское ш., 4, Россия

⁴ Воронежский государственный университет, 394018, Воронеж, Университетская площадь, 1, Россия

⁵ Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а, Россия

⁶ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

⁷ Казанский федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, Республика Татарстан, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются свойства статистического функционала, построенного по совокупности измерений Н-компоненты магнитного поля. Выявлена совокупность квазилинейных объектов с очень близкими параметрами. В рамках гипотезы о соответствии данных структур сейсмическим процессам проведена оценка характерных интервалов времени для фаз усиления и уменьшения уровня сдавливания литосферных плит в вероятных зонах подготовки надвигающихся землетрясений. Показано, что статистический подход в геофизических задачах может быть использован для оценки сейсмической опасности в рассматриваемом регионе в режиме, близком к реальному времени.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмичность; современные движения; геомагнитное поле; землетрясение; прогноз

1. ВВЕДЕНИЕ

Сейсмоэлектромагнитные явления – чувствительные индикаторы процессов развития землетрясений. Поскольку электромагнитные возмущения распространяются на значительные расстояния от источника, они могут использоваться для разработки методов прогноза землетрясений [Surkov, Pilipenko, 1999]. Перспективность поиска геомагнитных предвестников землетрясений показана рядом лабораторных и полевых экспериментов [Skovorodkin, 1985; Zhan, 1990].

В статье исследуются свойства статистики измерений магнитного поля, проведенных в июне 2021 г. на геофизическом полигоне Крымской астрофизической обсерватории РАН (КраО РАН) в Кацивели (Республика Крым), а также на магнитовариационной станции Borok International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET). При проведении анализа был использован подход, ранее примененный в работах [Kogan, 2015; Kogan et al., 2021; Volvach et al., 2022]. Соответствующая методика учитывает изменение свойств плотности вероятности любого случайного процесса, вызванного появлением дополнительного слагаемого, которое правомерно полагать слабосвязанным с фоновым шумом.

В ходе проведенных ниже вычислений будет эмпирически доказано существование феноменов с высокой степенью детерминированности. Они проявляются

в почти полном совпадении эффективной скорости изменения указанного статистического функционала для значительного числа интервалов времени. С учетом свойств применяемой методики данный факт может быть с высокой вероятностью интерпретирован как проявление повторяющегося во времени цикла «увеличение – уменьшение» напряжений сжатия в литосфере.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ

Подобно [Kogan, 2015; Kogan et al., 2021; Volvach et al., 2022] будем считать, что измеряемые далее значения любой компоненты $B(t)$ магнитного поля в момент времени t могут быть записаны в виде суммы следующего вида:

$$B(t) = B_1(t) + B_2(t). \quad (1)$$

В (1) слагаемое $B_1(t)$ – фоновый шум, сводящийся к совокупности обычных явлений, тогда как случайный процесс $B_2(t)$ связан исключительно с влиянием сейсмической активности в регионе порядка одной – двух тысяч километров от точки наблюдения. Как было указано во Введении, рассматривается гипотеза о независимости или слабой зависимости этих двух случайных величин. Далее рассматриваются 48-часовые интервалы измерений, каждый из которых разбивается

на отрезки реализации длительностью в одну минуту. Каждому подобному минутному отрезку ставится в соответствие 60 отсчетов (по одному в одну секунду). Подобно [Kogan et al., 2021] для каждого отрезка реализации вычисляется значение статистического функционала:

$$L(n) = \frac{A}{M} \sum_{l=n-(M-1)}^n |\mathcal{L}_l|, \mathcal{L}_l = \sum_{m=j}^{N-1} (-1)^m P_{m,l}. \quad (2)$$

В (2) $M=100$, множитель $A=1000$ вводится с целью перехода к удобному для анализа диапазону области значений функционала $L(n)$, индекс – номер отрезка реализации, а значение отвечает времени завершения отрезка реализации с этим номером (т.е. числу минут с момента начала соответствующего 48-часового интервала). Кроме того, в (2) любой множитель $P_{m,l}$ есть соответствующий указанному отрезку реализации номер l вероятности попадания значения функции $f[B(t)]$ от измеренной случайной величины (СВ) $B(t)$ в m -й интервал области значений вида:

$$F[B(t)]_{\min} + mh \leq F[B(t)] < F[B(t)]_{\min} + (m+1)h, \quad (3) \\ 0 \leq m \leq N-1.$$

В (3) функция $F[X]=\sin(X)$ (см. [2]) и $F[B(t)]_{\min} \geq -1$ – минимальное для данного отрезка реализации значение $F[B(t)]$. Здесь и далее в (3) интервал дискретизации задаем равным $h=0.01$, поэтому в (2) и (3) $N=200$.

С целью пояснения действия функционала (2) предположим вначале, что в (2) и (3) $F[B(t)]=B(t)$, а также что в (1) отсутствует слагаемое $B_2(t)$. Тогда любая вероятность $P_{m,l}$ может быть записана в виде:

$$P_{m,l} = f_1(m) + f_2(m). \quad (4)$$

Здесь $f_1(m)$ отвечает неизвестной «истинной» плотности вероятности, которая соответствовала бы бесконечно большому числу измерений. В то же время слагаемое $f_2(m)$ есть отклонение от $f_1(m)$, связанное с конечным числом отсчетов на данном отрезке реализации.

Справедливо утверждение, что если в (3) интервал дискретизации h много меньше эффективной области значений измеряемого поля, то с высокой вероятностью

$$|f_1(m) - f_1(m-1)| = 0(h). \quad (5)$$

Это означает, что при указанном условии $|f_1(m) - f_1(m-1)| \rightarrow 0$ при $h \rightarrow 0$, т.е. зависимость $f_1(m)$ мало изменится при переходе между соседними ячейками распределения (3). В то же время значения $f_2(m)$, определяемые ограниченным числом отсчетов, которые не связаны условием вида (5), могут намного сильнее изменяться даже при изменении m на единицу и в общем случае являются знакопеременными, поэтому именно $f_2(m)$ определяет мелкомасштабную изменчивость эмпирического вероятностного распределения (4).

Пусть теперь слагаемое $B_2(t)$ в (1) присутствует, и при этом масштаб ΔB_2 его изменения в пределах данного отрезка реализации удовлетворяет условию

$$\Delta B_2 \geq (2-3)h. \quad (6)$$

Учтем, что для суммы (1) двух независимых случайных величин имеет место соотношение

$$\rho_l(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_l^1(w') \rho_l^2(w-w') dw', \quad (7)$$

где $\rho_l(w)$ – непрерывная плотность вероятности для случайной величины B , а $\rho_l^{(1)}(w)$ и $\rho_l^{(2)}(w)$ – аналогичные величины для СВ B_1 и соответственно B_2 , см. (1), или его дискретный аналог для рассматриваемого разбиения измеряемых значений вида (3). Отсюда следует, что при справедливости (6) в результате выполнения свертки (7) или соответствующей дискретной суммы будет происходить эффективное усреднение флуктуирующей зависимости $f_2(m)$. В результате для всех отрезков реализации эффективная амплитуда мелкомасштабных вариаций этой случайной зависимости с высокой вероятностью будет уменьшаться. В свою

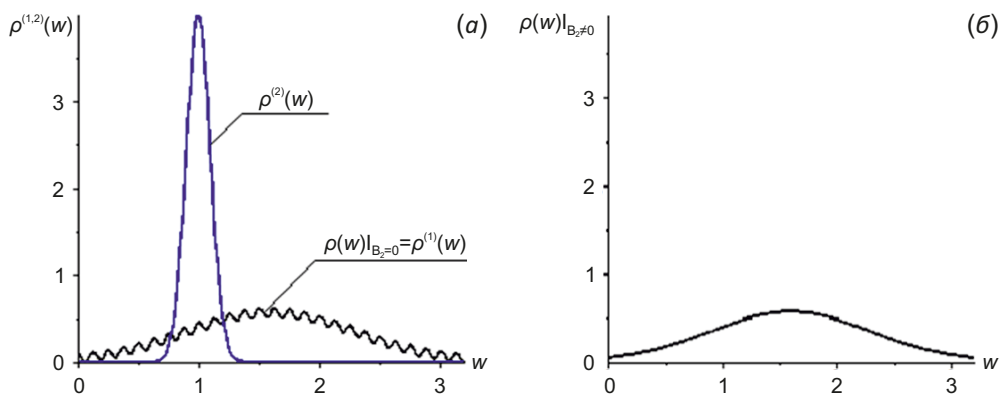


Рис. 1. Схематический вид эмпирической плотности вероятности измеряемого случайного процесса $B(t)$ для одного отрезка реализации при отсутствии (широкая кривая) (а) и при существовании в сумме (1) независимого случайного слагаемого $B_2(t)$ (б). Узкая синяя кривая – схематическая плотность вероятности значений процесса $B_2(t)$.

Fig. 1. Schematic representation of an empirical probability density function of a measurable stochastic process $B(t)$ for one-segment implementation in the absence (wide curve) (a) and in the presence of an independent random part $B_2(t)$ in sum (1) (b). A narrow blue curve is a schematic of probability density function of $B_2(t)$ process values.

очередь, это уменьшение должно с высокой вероятностью привести к изменению свойств функционала (2). Подчеркнем, что для предлагаемой методики принципиален фактор независимости слагаемых в правой части (1), благодаря которому амплитуда и знак случайной величины B_2 не зависят от B_1 . Такая независимость обеспечивает равную вероятность указанного уменьшения модуля разности $P_{l,m}$ и $P_{l,m+1}$ для всех возможных m .

На рис. 1 приведен схематический вид непрерывной плотности вероятности $\rho_1(w)$ при отсутствии в (1) случайного процесса $B_2(t)$ (широкая «шероховатая» кривая на рис. 1, а) и при его существовании (значительно

более «гладкая» кривая на рис. 1, б). На рис. 1, 2, 3 с целью большей наглядности изображения индексы l , указывающие на номер отрезка реализации, не приводятся.

На рис. 2 так же схематично показана совокупность дискретных значений вероятностей $P_m, m=0,1,\dots,N-1$ при отсутствии (рис. 2, а) и при существовании (рис. 2, б) в (1) независимого слагаемого $B_2(t)$. Здесь пунктирная линия схематически изображает «истинную» (т.е. отвечающую бесконечному числу отсчетов при произвольно большой продолжительности данного отрезка реализации) плотность вероятности для значений процесса $B_1(t)$, а интервал Δ_2 отвечает ширине вероятностного

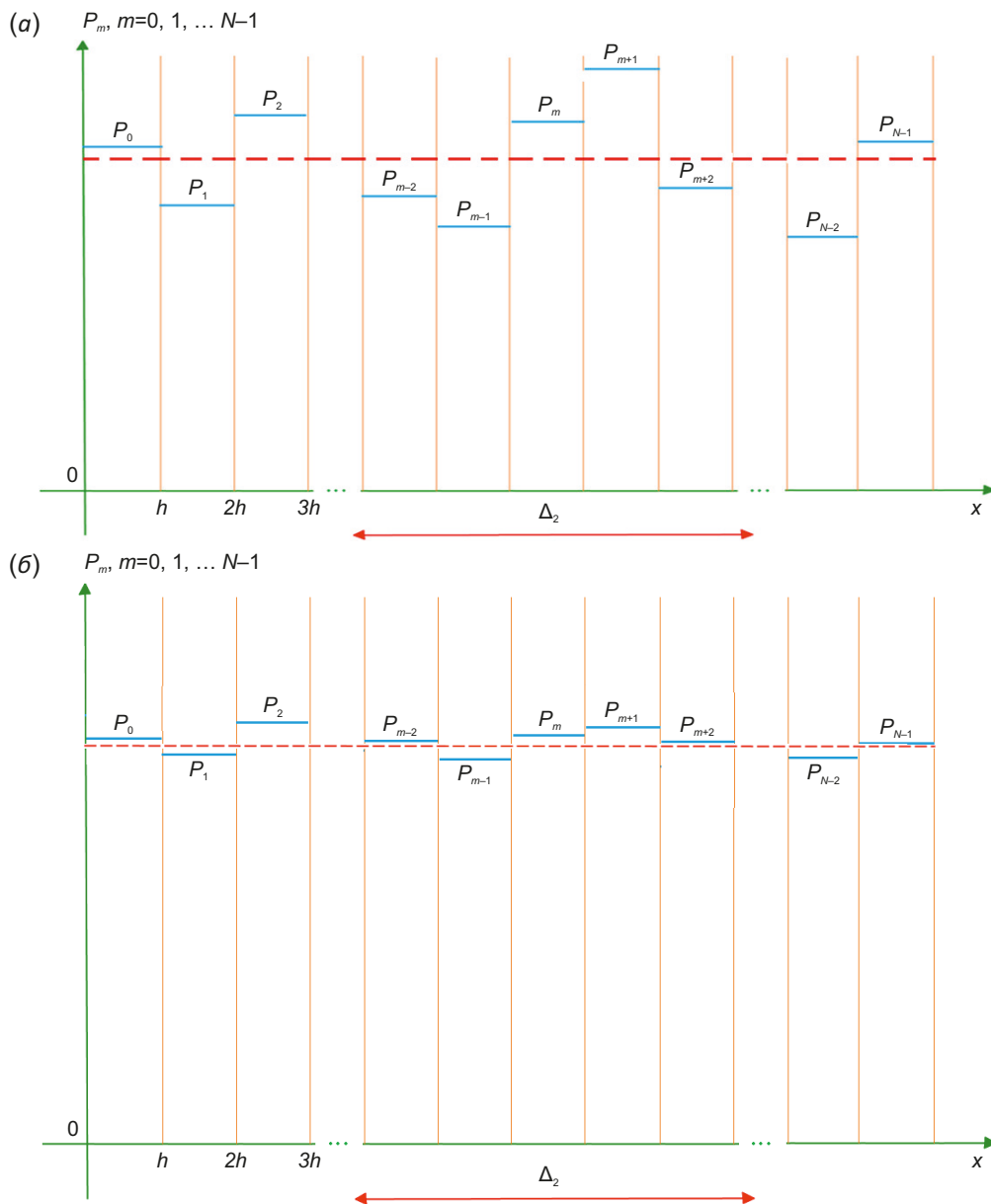


Рис. 2. Схематическое распределение вероятностей попадания результатов измерений случайного процесса $B(t)$ в ячейки вида (3) его области значений для одного отрезка реализации: (а) – при отсутствии слагаемого $B_2(t)$; (б) – при существовании слагаемого $B_2(t)$.

Fig. 2. Schematic distribution of the probability of hitting the measurement results for stochastic process $B(t)$ in cells (3) in a range of values for one-segment implementation: (а) – in the absence of part $B_2(t)$; (б) – in the presence of part $B_2(t)$.

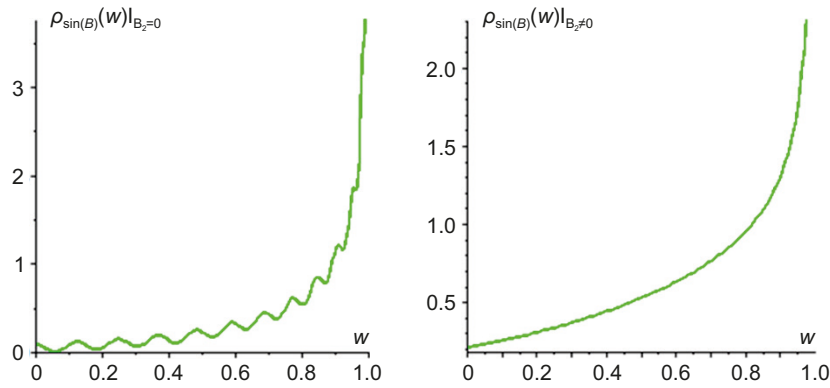


Рис. 3. Схематическое изображение плотности вероятности $\rho_{\sin(B)}(w)$ значений случайного процесса $\sin[B(t)]$ на интервале $0 \leq w \leq 1$ при отсутствии (рис. 1, а) и при существовании (рис. 1, б) в сумме (1) независимого случайного слагаемого $B_2(t)$.
Fig. 3. Schematic representation of the probability density $\rho_{\sin(B)}(w)$ of the values of a random process $\sin[B(t)]$ on the interval $0 \leq w \leq 1$ in the absence (Fig. 1, a) and in the presence (Fig. 1, б) of independent random part $B_2(t)$ in sum (1).

распределения для случайного процесса $B_2(t)$. Как показано на рис. 2, при возникновении в (1) независимого случайного процесса $B_2(t)$, с учетом (6), будет происходить значительное уменьшение амплитуды мелкомасштабных флуктуаций дискретной эмпирической плотности вероятности для ансамбля измеряемых значений процесса $B(t)$.

Теперь учтем, что при переходе вместо $F[B(t)]=B(t)$ к зависимости $F[B(t)]=\sin[B(t)]$ (см. (3)) при записи соответствующей плотности вероятности $\rho_{\sin}(w)$ возникает интегрируемая особенность в виде множителя $(1-w^2)^{-1/2}$, где переменная отвечает области значений случайной величины $\sin[B(t)]$. На рис. 3 схематически показан вид функции $\rho_{\sin}(w)$ при $0 \leq w \leq 1$. С учетом данного множителя при $|w| \sim 1$ будет значительно усиливаться различие между амплитудой мелкомасштабных вариаций функции $\rho_{\sin}(w)$ при отсутствии и, наоборот, в случае существования слагаемого $B_2(t)$ в (1). Следовательно, с высокой вероятностью должно увеличиться и различие между соответствующими зависимостями $L(n)$, см. (2). Другими словами, указанный переход от измеряемых стохастических значений $B(t)$ к исследованию случайной величины $\sin[B(t)]$ выполняет роль «увеличительного стекла», позволяющего усилить различие между свойствами функционала (2) при существовании и при отсутствии второго слагаемого в (1).

Таким образом, при существовании слагаемого $B_2(t)$, связанного с влиянием сейсмических процессов, для совокупности соответствующих отрезков реализации могут значительно измениться свойства зависимости $L(n)$. Уровень такого изменения прямо пропорционален ширине вероятностного распределения случайной величины B_2 . Отметим также, что, как показано в статье [Kogan et al., 2021], этот функционал связан с уровнем энтропии значений случайного процесса $B(t)$, величина которой существенно возрастает при появлении в (1) независимого от $B_1(t)$ случайного слагаемого $B_2(t)$. Заметим также, что, согласно [Kogan et al., 2021], имеет место эффект неоднократного, от 2 до 5 раз,

почти точного повторения значений указанного функционала в моменты начала сейсмических событий. Такой феномен означает высокую вероятность повторения также и скоростей развития физических процессов в зонах подготовки землетрясения. Влияние этих процессов определяет свойства применяемого статистического функционала на соответствующих интервалах времени. Данная гипотеза подтверждается результатами исследований, описанных в статье.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 приведена зависимость $L(n)$, рассчитанная по результатам измерений Н-компоненты магнитного поля 1 и 2 июня 2021 г. цифровой магнитовариационной станцией (ЦМВС) на полигоне КраО РАН в Кацивели. На всех приведенных далее рисунках горизонтальная ось соответствует времени UTC в минутах при $n \geq M=100$ мин после начала первых суток соответствующего 48-часового временного интервала.

Назовем локальными трендами квазимонотонные и квазипостоянные по скорости изменения участки кривой $L(n)$. Для точек начала и завершения тренда горизонтальное расстояние до ближайшей линии кривой (2) хотя бы с одной стороны должно составлять не менее 100 мин. Кроме того, средняя скорость изменения зависимости (2) в пределах тренда должна либо быть другого знака, либо не менее чем в два раза отличаться по величине от аналогичной средней скорости на участке длительностью 50 мин, прилегающем извне к соответствующей границе тренда. Также вводим требование, что для любого локального тренда вертикальный масштаб вариации δL между точками его начала и завершения (т.е. абсолютной величины разности значений зависимости $L(n)$ в этих точках) должен удовлетворять условию:

$$\delta L \geq 0.2 \Delta L_{\max} \tag{8}$$

В (8) ΔL_{\max} – это разность наибольшего максимума и наименьшего минимума функционала (2) на всем рассматриваемом 48-часовом интервале. При этом

полагаем необходимым, чтобы геометрическое отклонение точек локального тренда от сегмента прямой линии, проходящей через точки его начала и завершения, не превышало 10 % от определенного выше значения δL . На рис. 4 примерами локальных трендов могут служить, например, сегменты a–b, g–i и s–t данной кривой.

Прямые 1–3, проведенные через граничные точки соответствующих локальных трендов (будем называть их осевыми линиями соответствующих трендов или просто осями), обладают высокой степенью взаимной параллельности. Для определенности обозначим $\Delta\alpha_{i,j}$ углы между осевыми линиями с номерами i и j , полагая, что эти углы отвечают равенству единиц вертикальной и горизонтальной оси на соответствующих рисунках; данные «истинные» значения углов между соответствующими определяются с использованием свойств скалярного произведения векторов, отвечающих рассматриваемым прямым. Вместе с тем для наглядности будем рассматривать значения $\Delta\tilde{\alpha}_{i,j}$ – реальных углов между этими же прямыми на приведенных в статье изображениях. При этом полагаем, что соотношение вертикального и горизонтального размера приведенных рисунков с достаточной точностью составляет 1:2. Очевидно, что для всех рисунков значения $\Delta\alpha_{i,j}$ существенно меньше $\Delta\tilde{\alpha}_{i,j}$.

В данном случае на рис. 4 углы между прямыми 1 и 2 и, соответственно, 1 и 3 составляют $\Delta\tilde{\alpha}_{1,2} \approx 1.2^\circ$ и $\Delta\tilde{\alpha}_{1,3} \leq 0.5^\circ$. По аналогии, для осевых линий 4–8 угол $\Delta\tilde{\alpha}_{4,6} \approx 1.0^\circ$, а углы между всеми остальными указанными прямыми не превышают 0.5° . Точно так же

$\Delta\tilde{\alpha}_{9,10} \leq 0.5^\circ$ и $\Delta\tilde{\alpha}_{11,12} \leq 0.5^\circ$. Здесь и далее будем считать, что осевые линии с номерами i и j , для которых углы

$$\Delta\tilde{\alpha}_{i,j} \leq 1.5^\circ, \tag{9}$$

принадлежат к одной и той же группе подобных прямых.

С целью иллюстрации близости направлений рассматриваемых линий на рис. 4 приведены прямые 1'–12', строго параллельные осевым линиям с соответствующими номерами, но без символа «'». Физический смысл почти полной параллельности групп указанных прямых обсудим далее.

В табл. 1 приведены значения интервалов $T_{1-12'}$, соответствующих продолжительности времени между точками начала и завершения соответствующих осевых линий (рис. 4). Интервалы T_p , $i=1-12$, относящиеся к рассмотренным различным группам, отличающимся по признаку взаимной квазипараллельности, в данной таблице выделены расположением в центре или соответственно по краю ячеек столбца номер 2, отвечающего рис. 4. Аналогичное выделение по таким группам будет проведено и для других рисунков.

На рис. 5 приведена зависимость $L(n)$, рассчитанная по результатам измерений H -компоненты магнитного поля 5 и 6 июня 2021 г. магнитометром на полигоне КраО РАН в Качивели. Группы осевых линий 1–2, 3–5, 7–8, 9–10 и 11–13, проведенные через граничные точки отвечающих им локальных трендов, обладают высокой степенью взаимной параллельности. Углы между указанными прямыми линиями в данных группах не

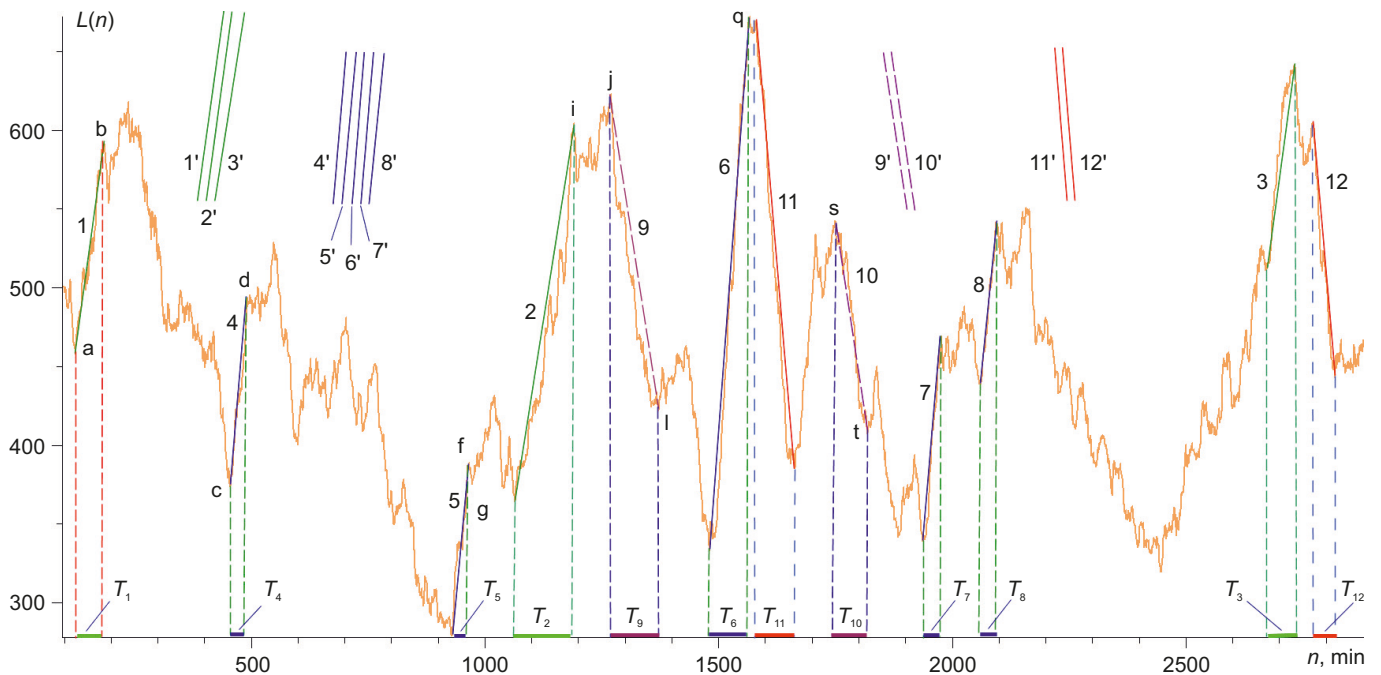


Рис. 4. Зависимость $L(n)$ для H -компоненты магнитного поля по данным измерений за 1 и 2 июня 2021 г., построенная по данным ЦМВС Качивели.

Fig. 4. Dependence $L(n)$ for H -component of the magnetic field according to the measurement data for June 1 and 2, 2021, plotted from the Katsiveli DMVS data.

превышают 0.5–0.7°, за исключением $\Delta\tilde{\alpha}_{5,6} \approx \Delta\tilde{\alpha}_{11,12} \approx 1.0^\circ$ (см. прямые 1–13, смысл которых аналогичен рис. 4). В табл. 1 приведены значения интервалов T_{1-13} , соответствующих продолжительности времени между точками начала и завершения соответствующих осевых линий (рис. 5).

На рис. 6 приведена зависимость $L(n)$, рассчитанная по результатам измерений Н-компоненты магнитного поля 15 и 16 июня 2021 г. магнитометром на полигоне КрАО РАН в Кацивели. Группы осевых линий 1–4 и соответственно 5–8, проведенные через граничные точки отвечающих им локальных трендов, обладают

Таблица 1. Интервалы времени существования взаимно квазипараллельных осевых линий
Table 1. Time intervals of existence of mutually quasi-parallel axial lines

Номер <i>i</i> -го интервала	1 и 2 июня 2021 г, мин (рис. 4)	5 и 6 июня 2021 г, мин (рис. 5)	15 и 16 июня 2021 г, мин (рис. 6)	26 и 27 июня 2021 г, мин (рис. 7)	23 и 24 июня 2021 г, мин (рис. 8)
1	58	85	72	101	42
2	126	105	131	73	38
3	61	100	74	37	51
4	34	97	77	34	104
5	35	26	47	61	88
6	86	24	33	92	57
7	39	99	59	140	45
8	32	99	30	68	100
9	102	96	-	122	66
10	69	100	-	96	102
11	83	100	-	76	100
12	46	35	-	-	99
13	-	57	-	-	131
14	-	-	-	-	184

Примечание. Красным шрифтом выделены интервалы, отвечающие участкам возрастания кривой $L(n)$, а смещением внутри столбцов – интервалы, соответствующие одной и той же группе квазилинейных участков кривой $L(n)$.

Note. Red color shows the intervals corresponding to the segments of $L(n)$ curve increase, and displacement in the columns stands for the intervals corresponding to one and the same group of quasi-linear $L(n)$ curve segments.

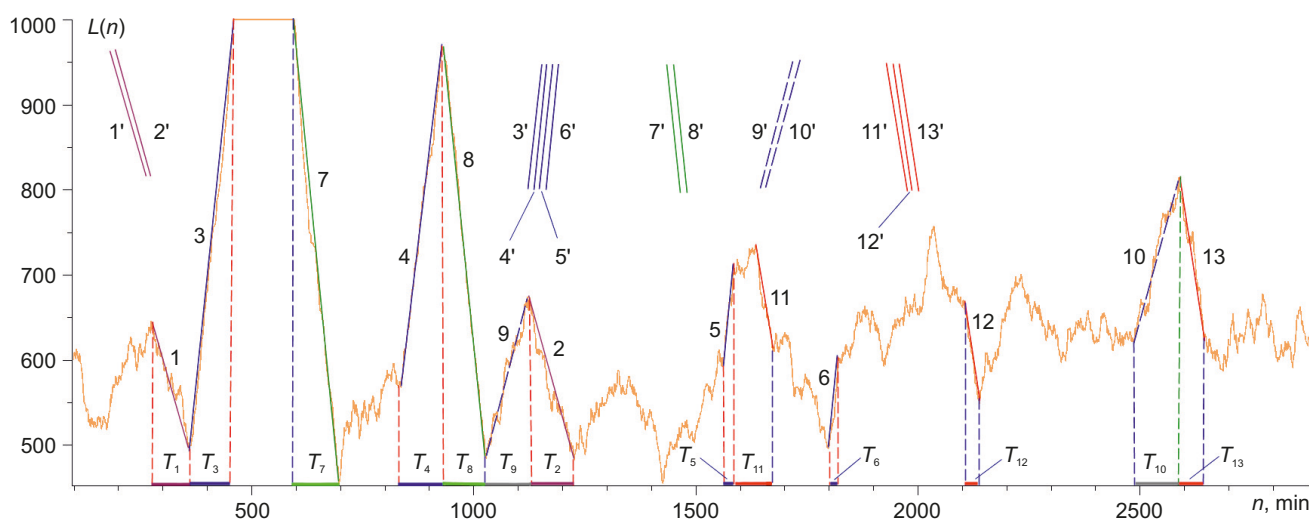


Рис. 5. Зависимость $L(n)$ для Н-компоненты магнитного поля по результатам измерений за 5 и 6 июня 2021 г, построенная по данным ЦМВС Кацивели.

Fig. 5. Dependence $L(n)$ for H-component of the magnetic field according to the measurement data for June 5 and 6, 2021, plotted from the Katsiveli DMVS data.

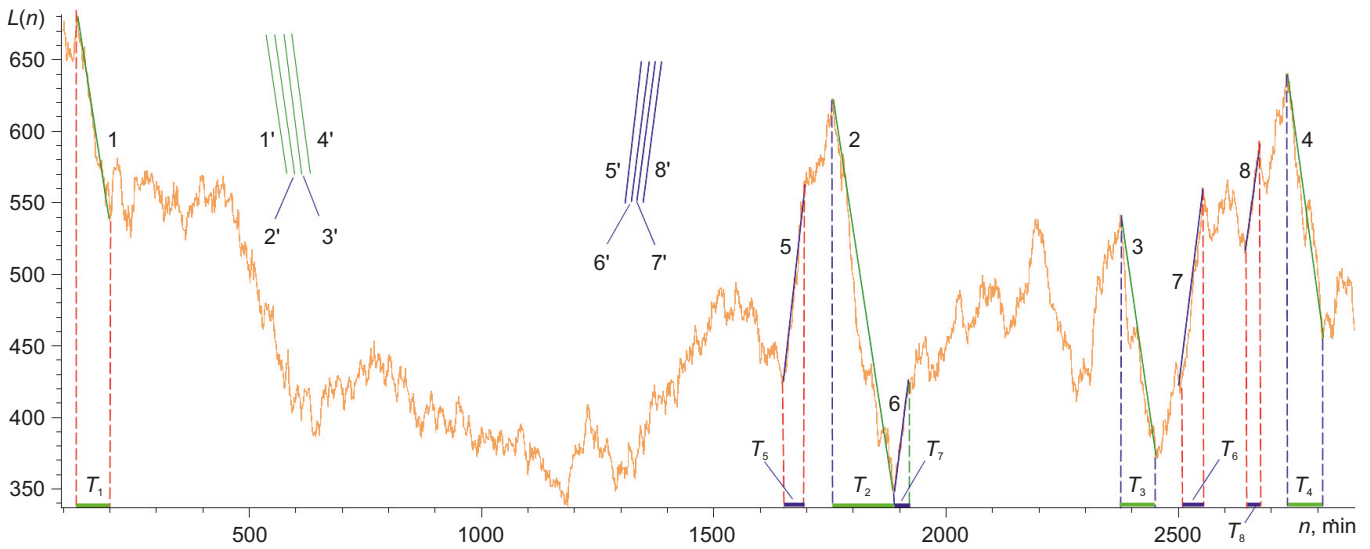


Рис. 6. Зависимость $L(n)$ для H-компоненты магнитного поля по результатам измерений за 15 и 16 июня 2021 г, построенная по данным ЦМВС Кацивели.

Fig. 6. Dependence $L(n)$ for H-component of the magnetic field according to the measurement data for June 15 and 16, 2021, plotted from the Katsiveli DMVS data.

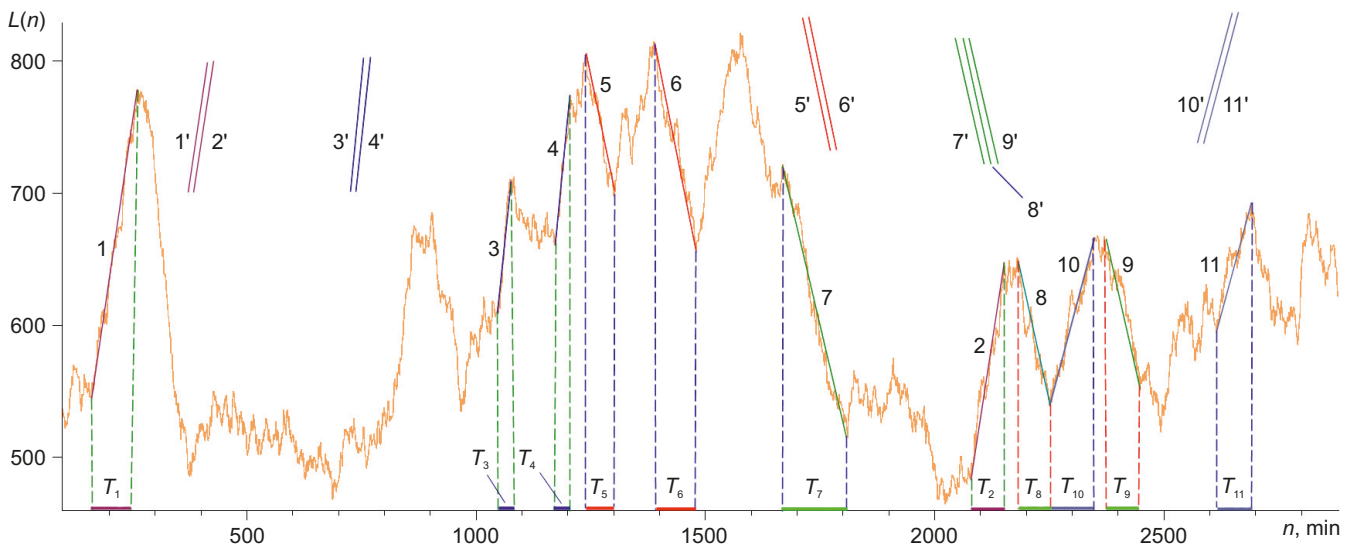


Рис. 7. Зависимость $L(n)$ для H-компоненты магнитного поля по результатам измерений за 26 и 27 июня 2021 г, построенная по данным ЦМВС Кацивели.

Fig. 7. Dependence $L(n)$ for H-component of the magnetic field according to the measurement data for June 26 and 27, 2021, plotted from the Katsiveli DMVS data.

высокой степенью взаимной параллельности. В данном случае углы между указанными прямыми линиями составляют $\Delta\tilde{\alpha}_{1,2} \approx \Delta\tilde{\alpha}_{1,3} \approx 1.0^\circ$, $\Delta\tilde{\alpha}_{5,6-8} \approx 1.2^\circ$; различие направлений остальных осевых линий в указанных группах (рис. 6) не превышает $0.5-0.7^\circ$ (см. прямые 1'-8', смысл которых аналогичен рис. 4). В табл. 1 приведены значения интервалов $T_{1-8'}$, соответствующих продолжительности времени между точками начала и завершения соответствующих осевых линий (рис. 6).

На рис. 7 приведена зависимость $L(n)$, рассчитанная по результатам измерений H-компоненты магнитного

поля 26 и 27 июня 2021 г. магнитометром на полигоне КраО в Кацивели. Все отмеченные на рисунке группы осевых, проведенные через граничные точки отвечающих им локальных трендов, обладают высокой степенью взаимной параллельности. В данном случае разность направлений между осевыми линиями в группах 1-2, 3-4, 5-6, 7-9, 10-11 не превышает $0.5-0.7^\circ$, за исключением углов $\Delta\tilde{\alpha} \approx \Delta\tilde{\alpha}_{8,9} \approx 1.1^\circ$ (см. прямые 1'-11', смысл которых аналогичен рис. 4). В табл. 1 приведены значения интервалов $T_{1-11'}$, соответствующих продолжительности времени между точками начала и завершения отвечающих им осевых линий (рис. 7).

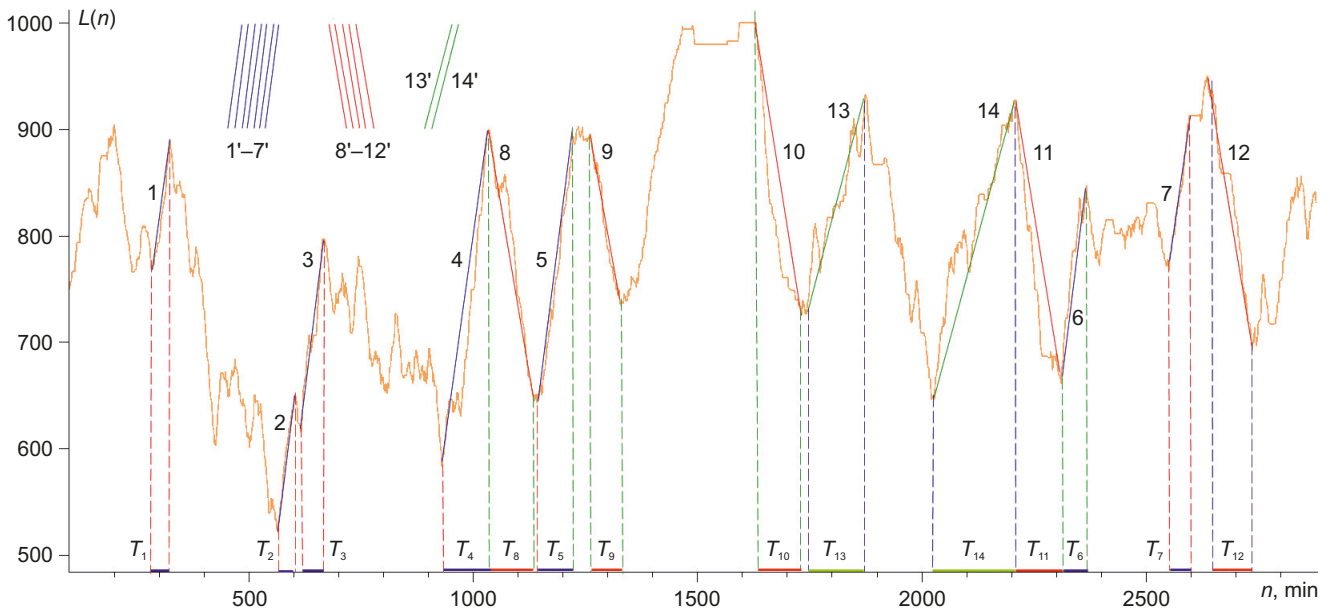


Рис. 8. Зависимость $L(n)$ для Z-компоненты магнитного поля по данным измерений магнитометра Borok за 23 и 24 июня 2021 г.

Fig. 8. Dependence $L(n)$ for Z-component of the magnetic field according to the Borok magnetometer measurements for June 23 and 24, 2021.

С целью дополнительной верификации полученных результатов на рис. 8 приведен результат расчетов, аналогичных рис. 4, 5, 6, 7, для Z-компоненты геомагнитного поля по результатам измерений магнитометра на станции Borok международной сети INTERMAGNET, проведенных 23 и 24 июня 2021 г. Все параметры функционала (2) – те же, что и ранее. На рис. 8 очевиден отмеченный выше эффект квазипараллельности групп осевых линий. В частности, углы между группами прямых 1–7, 8–12 и 13–14 удовлетворяют (9), что иллюстрируется ансамблями прямых 1'–7', 8'–12' и 13'–14', смысл которых тот же, что и для рис. 4, 5, 6, 7. Как видно из табл. 1, длительность интервалов $T_{1-14'}$, отвечающих указанному магнитометру, относится фактически к тому же, что и ранее, интервалу значений.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 4, 5, 6, 7, 8, зависимости $L(n)$, построенные по измерениям H- и Z- компонент геомагнитного поля, проведенным с помощью магнитовариационных станций Кацивели (Россия, Республика Крым) и, соответственно, станции Borok в июне 2021 г., содержат несколько локальных последовательностей квазилинейных участков длительностью от получаса до трех часов с повторяющимися с большой точностью средними скоростями измерения функционала (2). Такое свойство должно отражать совпадение параметров физических явлений, связанных с генерацией магнитного поля. Действительно, как было показано в Разделе 2 этой статьи (см. также [Kogan, 2015; Kogan et al., 2021; Volvach et al., 2022]), величина значений данного функционала существенно изменяется при возникновении

в сумме (1) независимого случайного слагаемого $B_2(t)$, увеличение или уменьшение ширины вероятностного распределения значений которого приводит к убыванию или, соответственно, к возрастанию значений $L(n)$, поэтому рассматриваемые квазилинейные участки на рис. 5, 6, 7, 8 отвечают интервалам времени с почти совпадающими скоростями уменьшения (возрастающие сегменты кривой $L(n)$) или усиления (убывающие участки $L(n)$) эффективной амплитуды независимой составляющей магнитного поля $B_2(t)$ при измерениях, осуществляемых цифровой магнитовариационной станцией. Наиболее вероятным кандидатом на источник таких геомагнитных возмущений являются сейсмические процессы, поскольку ни магнитные бури, ни атмосферные события не обладают свойством столь жесткого повторения параметров возникающих явлений, в отличие от процессов на межплитных границах. Данное предположение о связи рассмотренных выше групп линейных объектов, выявленных при исследовании зависимости $L(n)$, и феноменов, связанных с подготовкой землетрясений, носящее гипотетический характер, не противоречит всей совокупности фактов, рассматриваемых в данной статье.

Рис. 4 и 6 соответствуют периодам геомагнитных возмущений (в эти дни отмечались малые или умеренные (16 июня 2021 г.) магнитные бури), а рис. 5 и 7 – интервалам времени с минимальной геомагнитной активностью. При этом во всех случаях количество рассматриваемых графических линейных феноменов оказывается вполне соизмеримым. Таким образом, с высокой вероятностью возникновение квазилинейных участков кривой $L(n)$ оказывается не связанным (или слабосвязанным) с магнитными бурями.

Как отмечено выше, с учетом результатов работ [Kogan, 2015; Kogan et al., 2021; Volvach et al., 2022] можем утверждать, что восходящие участки кривой $L(n)$ отвечают уменьшению, а нисходящие – увеличению ширины вероятностного распределения «дополнительного» случайного процесса $B_2(t)$, независимого (или слабозависимого) от фонового шума $B_1(t)$.

По аналогии интервалы убывания зависимости $L(n)$ отвечают периодам критического уровня тектонического напряжения в области наиболее интенсивно взаимодействующих литосферных блоков. Близость значений углов наклона рассматриваемой кривой в пределах таких участков также с высокой вероятностью свидетельствует о существенном совпадении соответствующих средних скоростей возрастания величины сейсмического давления на двух или более временных промежутках. Объяснение подобного явления может сводиться к сохранению скоростей движения литосферных плит на локальных, порядка одних-двух суток, интервалах времени.

Аргументом в пользу подобного объяснения (для участков как возрастания, так и убывания значений $L(n)$) может считаться часто встречающийся феномен почти полного совпадения интервалов T_i в табл. 1 для квазипараллельных прямых, входящих в одни и те же группы. Это относится к интервалам T_4, T_5, T_7 и T_8 на рис. 4, к T_3 и T_4 , к T_5 и T_6 , к T_7 и T_8 , к T_9 и T_{10} на рис. 5, к T_1, T_2 и T_4 , к T_6 и T_8 на рис. 6, к T_3 и T_4 на рис. 7, а также к T_1 и T_2 , к T_3 и T_6 , к T_8 и T_{10-12} на рис. 8. Следовательно, имеет место фактическое повторение (и в том числе неоднократное) значительных сегментов кривой $L(n)$ и отвечающих им физических зависимостей на соответствующих промежутках времени почти в половине рассматриваемых эпизодов. В данном случае такие зависимости могут быть связаны с возникновением больших электромагнитных флуктуаций как при достижении критического уровня тектонического напряжения, так и во время возникновения локальной сети разломов.

На основании статистики данных табл. 1, определенных для возрастающих участков зависимости $L(n)$, получаем оценки для среднего значения $\langle T_{incr} \rangle = 61$ мин и стандарта флуктуаций мин для совокупности соответствующих интервалов в табл. 1. Для ансамбля интервалов времени, которые приведены в табл. 1 и отвечают убывающим квазилинейным сегментам зависимости (2), аналогичные статистические параметры составляют $\langle T_{decr} \rangle = 86$ мин и $\sigma_{incr} = 26$ мин. Таким образом, характерное время критической фазы максимального сдавливания составляет от 20–30 мин до одного-двух часов.

Согласно проведенным расчетам, является правомочным предположение о связи каждой из групп квазипараллельных сегментов кривой (2) со «своим» источником геофизической активности, поэтому, полагая, что магнитометр на указанном полигоне КраО в Кацивели способен измерять геомагнитные поля, генерируемые в радиусе одной-двух тысяч километров, приходим к

выводу о том, что в соответствующем географическом районе происходит одновременное функционирование от двух до пяти различных зон подготовки приближающихся землетрясений (см. рис. 4, 5, 6, 7).

Повторение рассматриваемых свойств функционала (2), отвечающего данным как ЦМВС Кацивели, так и магнитометра Вогок, может рассматриваться как дополнительная верификация достоверности функционирования обеих указанных измерительных систем.

Как следует из полученных результатов, статистический подход в геофизических задачах может быть применен не только путем использования закона Гутенберга – Рихтера [Gutenberg, Richter, 1956; Tahir et al., 2012; Cao A., Gao S.S., 2002], позволяющего прогнозировать вероятность землетрясений на интервалах порядка месяцев и более, но и для оценки сейсмических процессов в рассматриваемом регионе в режиме, близком к реальному времени.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены свойства статистики измерений магнитного поля, проведенных в июне 2021 г. на полигоне КраО РАН в Кацивели (Республика Крым). В результате проведенных вычислений были выявлены квазилинейные структуры с повторяющимися свойствами в зависимости от значений времени применяемого статистического функционала. В рамках гипотезы о соответствии данных структур сейсмическим процессам, оказывающим влияние на геомагнитную обстановку в районе указанного полигона, проведена оценка эффективных значений времени активной фазы процессов сейсмического сжатия и последующего его уменьшения, связанного с возникновением сети разломов. Наиболее важным результатом данной работы является возможность оценки протекающих сейсмических процессов в режиме, близком к реальному времени.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты исследований, представленные в этой статье, основаны на данных, собранных в магнитных обсерваториях. Мы благодарим поддерживающие их национальные институты и INTERMAGNET за продвижение высоких стандартов практики магнитных обсерваторий (www.intermagnet.org). Авторы выражают благодарность рецензенту за полезные замечания, позволившие улучшить качество работы.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Cao A., Gao S.S., 2002. Temporal Variation of Seismic B-Values beneath Northeastern Japan Island Arc. *Geophysical Research Letters* 29 (9), 48-1–48-3. <https://doi.org/10.1029/2001GL013775>.

Gutenberg B., Richter C.F., 1956. Magnitude and Energy of Earthquakes. *Annals of Geophysics* 9 (1), 1–15. <https://doi.org/10.4401/ag-5590>.

Kogan L.P., 2015. Change in Statistical Functionals of Critical Frequency Prior to Strong Earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy* 55, 507–520. <https://doi.org/10.1134/S0016793215040064>.

Kogan L.P., Bubukin I.T., Shtenberg V.B., 2021. To the Question of Calculating the Probability of Strong Earthquakes in Real Time. *Chaos, Solitons & Fractals* 145, 110807. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110807>.

Skovorodkin Yu.P., 1985. A Study of Tectonic Processes by Magnitometric Methods. Publishing House of the Institute of

Physics of the Earth of the USSR Academy of Science, Moscow, 196 p. (in Russian) [Сковородкин Ю.П. Изучение тектонических процессов методами магнитометрии. М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1985. 196 с.].

Surkov V., Pilipenko V., 1999. The Physics of the Pre-Seismic Electromagnetic ULF Signals. In: M. Hayakawa (Ed.), *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. TERRAPUB, Tokyo, p. 357–370.

Tahir M., Grasso J.-R., Amorèse D., 2012. The Largest Aftershock: How Strong, How Far Away, How Delayed? *Geophysical Research Letters* 39 (4). <https://doi.org/10.1029/2011GL050604>.

Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., Nadezhka L.I., Bubukin I.T., Shtenberg, V.B., Gordetsov A.S., Krasnikova O.V., Kislitsyn D.I., 2022. Changes in the Properties of the Statistics of Physical and Biophysical Fields as Earthquake Precursor. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 108, 106200. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.106200>.

Zhan Zh., 1990. Geomagnetic Investigation for Searching Earthquake Precursors. *Journal of Seismological Research* 13 (4), 418–434.