



## ON ANISOTROPY OF THE EFFECTIVE CURRENT STRUCTURE IN THE PREPARATION ZONE FOR THE JULY 29, 2025, Mw 8.8 EARTHQUAKE OFF THE COAST OF KAMCHATKA

A.E. Volvach <sup>1</sup>✉, L.P. Kogan<sup>1,2</sup>, L.N. Volvach <sup>1</sup>, V.B. Shtenberg<sup>2</sup>, E.A. Revunova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Katsiveli 298688, Republic of Crimea, Russia

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65 Ilinskaya St, Nizhny Novgorod 603000, Russia

**ABSTRACT.** The present paper deals with the use of a probabilistic spectral analysis in the study of statistical properties of the variations in Z-component of electromagnetic field during 14 days prior to the July 29, 2025, M 8.8 earthquake which struck off Kamchatka. Additional analysis has been made on similar data for 9 days after the event. The analysis showed persistent differences in the statistical structure of geomagnetic variations at four spatially spaced magnitovariational stations. The persistence of differences is evidenced by the fact that they re-arise during the variation of processing parameters ( $N_1$ ,  $M$ ,  $h$ ). The results obtained are consistent with the model of directed (anisotropic) effective current structure forming in the earthquake preparation zone. A simple geometric assessment based on the Biot – Savart – Laplace Law yields angular orientations comparable with an axial direction of seismic zone. The revealed differences do not correlate with the level of moderate geomagnetic activity of the period considered and may reflect large-scale anisotropy of magnetic response in the pre-seismic interval. The proposed approach is oriented at the analysis of statistical structure of geomagnetic variations and can be used to identify spatial features of strong earthquake preparation process. Further testing of the method on independent events is required to assess its practical applicability.

**KEYWORDS:** seismicity; geodynamics; anisotropy of current directions; earthquake prediction; geomagnetic field; earthquake physics

**FUNDING:** Not specified.



EDN: JNSTNM

### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Alexandr E. Volvach, [volvach@bk.ru](mailto:volvach@bk.ru)

Received: March 12, 2026

Revised: May 8, 2026

Accepted: May 14, 2026

**FOR CITATION:** Volvach A.E., Kogan L.P., Volvach L.N., Shtenberg V.B., Revunova E.A., 2026. On Anisotropy of the Effective Current Structure in the Preparation Zone for The July 29, 2025, Mw 8.8 Earthquake off the Coast of Kamchatka. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (3), 0894. doi:10.5800/GT-2026-17-3-0894

## ОБ АНИЗОТРОПИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ТОКОВОЙ СТРУКТУРЫ В ЗОНЕ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ МАГНИТУДОЙ 8.8, ПРОИЗОШЕДШЕГО 29 ИЮЛЯ 2025 ГОДА У ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ

А.Е. Вольвач<sup>1</sup>, Л.П. Коган<sup>1,2</sup>, Л.Н. Вольвач<sup>1</sup>, В.Б. Штенберг<sup>2</sup>, Е.А. Ревунова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Крымская астрофизическая обсерватория РАН, 298688, Кацивели, Республика Крым, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, Россия

**АННОТАЦИЯ.** В данной работе с использованием метода спектрально-вероятностного анализа исследованы статистические свойства вариаций Z-компоненты геомагнитного поля в течение 14 сут, предшествовавших землетрясению магнитудой 8.8, произошедшему 29 июля 2025 г. у побережья Камчатки. Дополнительно проанализированы аналогичные данные за 9 сут после начала события. Проведенный анализ выявил устойчивые различия статистической структуры геомагнитных вариаций на четырех пространственно разнесенных магнитовариационных станциях. Обнаруженные особенности воспроизводятся при варьировании параметров обработки ( $N_1$ ,  $M$ ,  $h$ ), что свидетельствует об их устойчивости. Полученные результаты согласуются с моделью направленной (анизотропной) эффективной токовой структуры, формирующейся в зоне подготовки землетрясения. Простая геометрическая оценка, основанная на законе Био – Савара – Лапласа, дает угловые ориентации, сопоставимые с направлением оси сейсмоактивной зоны. Выявленные различия не коррелируют с уровнем умеренной геомагнитной активности рассматриваемого периода и могут отражать крупномасштабную анизотропию магнитного отклика в предсейсмический интервал. Предложенный подход ориентирован на анализ статистической структуры геомагнитных вариаций и может быть использован для выявления пространственных особенностей процессов подготовки сильных землетрясений. Дальнейшая проверка метода на независимых событиях необходима для оценки его практической применимости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сейсмичность; геодинамика; анизотропия направлений электрических токов; прогноз землетрясения; геомагнитное поле; физика землетрясений

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Не указано.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование возможных электромагнитных проявлений процессов подготовки сильных землетрясений остается одной из наиболее дискуссионных проблем современной геофизики. Начиная с 1970–1980-х гг. сообщалось о наблюдениях аномалий геомагнитного поля, электрического поля и ионосферных параметров, предшествовавших крупным сейсмическим событиям и интерпретировавшихся как их возможные предвестники [Hayakawa, Fujinawa, 1994; Hayakawa, 2015]. В последующие годы была сформулирована концепция литосферно-атмосферно-ионосферного взаимодействия (LAIC), согласно которой процессы накопления тектонических напряжений могут приводить к изменению электрофизических свойств приземной атмосферы и ионосферы [Pulinets, Ouzounov, 2011].

В рамках модели LAIC предполагается, что усиление деформаций в зоне будущего разлома сопровождается генерацией носителей заряда в горных породах [Freund, 2002, 2011], изменением концентрации радона и вариациями электрической проводимости приземного слоя атмосферы. Эти процессы могут приводить к модификации вертикального электрического тока глобальной электрической цепи и, как следствие, к возмущениям параметров ионосферной плазмы и токовых систем [Pulinets, Ouzounov, 2011; Ouzounov et

al., 2018]. В этом случае регистрируемые на удаленных станциях геомагнитные вариации отражают преимущественно перераспределение ионосферных токовых систем (Sq, DP2 и др.) на региональных и глобальных масштабах, а не прямое магнитное поле источников в гипоцентре. Следует отметить, что модель LAIC остается предметом дискуссий и ее отдельные элементы требуют дальнейшей экспериментальной проверки, однако она предоставляет удобную концептуальную основу для интерпретации возможных электромагнитных проявлений сейсмической активности. Наблюдения ионосферных вариаций, потенциально связанных с сейсмической активностью, обсуждаются также в ряде обзорных работ, например в [Liu, 2009]. При этом в ряде некоторых задач для описания пространственных свойств наблюдаемого магнитного отклика допускается использование эффективных геометрических моделей, не претендующих на детальное описание реальной структуры токовых систем.

В литературе подчеркивается, что вопрос о существовании надежных предвестников землетрясений остается дискуссионным [Geller, 1997], что требует осторожной интерпретации любых наблюдаемых аномалий. Несмотря на значительное число публикаций, проблема достоверности электромагнитных предвестников также остается открытой. Одной из основных

трудностей является отделение возможных литосферных сигналов от вариаций, обусловленных космической погодой и магнитосферной динамикой. В ряде критических работ отмечается, что многие ранее сообщенные электромагнитные аномалии могут быть объяснены магнитосферными возмущениями или особенностями обработки данных, включая переинтерпретацию известных случаев, таких как предполагаемый магнитный предвестник землетрясения Лома-Приета 1989 г. [Thomas et al., 2009; Masci, Thomas, 2015; Masci et al., 2015]. Это делает необходимым строгий учет индексов геомагнитной активности, использование контрольных интервалов, а также применение методов анализа, позволяющих уменьшить влияние внешних возмущений на интерпретацию результатов.

Эти обстоятельства подчеркивают необходимость использования подходов, ориентированных на анализ статистической структуры вариаций, а не только амплитудных отклонений, поскольку такие методы потенциально менее чувствительны к кратковременным внешним возмущениям.

В последние годы усиливается интерес к анализу не столько амплитудных аномалий, сколько статистической структуры геомагнитных вариаций. Предполагается, что изменения формы распределений, спектральных характеристик и вероятностных параметров временных рядов могут быть более чувствительными к слабым модификациям токовых систем, чем традиционные амплитудные показатели [Hayakawa, 2015; Ouzounov et al., 2018]. Использование данных с высоким

временным разрешением (1 с и лучше) открывает дополнительные возможности для выявления тонких статистических эффектов, которые не обнаруживаются при использовании стандартных минутных данных.

В настоящем исследовании применяется статистический подход, основанный на анализе функционала, характеризующего вероятностную структуру и спектральные свойства временных рядов геомагнитных вариаций. Методика развивает ранее предложенный вероятностный подход к анализу геофизических сигналов [Volvach et al., 2022a, 2022b, 2022c] и ориентирована на выявление пространственных различий статистических характеристик на разнесенных станциях. В отличие от методов, основанных на поиске экстремальных отклонений, данный подход позволяет анализировать изменение статистической структуры вариаций и обнаруживать слабые пространственно согласованные эффекты, не проявляющиеся на уровне отдельных амплитудных аномалий.

Настоящая работа посвящена анализу односекундных измерений Z-компоненты геомагнитного поля на четырех пространственно разнесенных магнитовариационных станциях в период, предшествующий землетрясению магнитудой 8.8, произошедшему 29 июля 2025 г. у побережья Камчатки. События такого масштаба представляют особый интерес в аспекте возможных крупномасштабных электромагнитных проявлений, поскольку процессы подготовки мегаземлетрясений могут охватывать значительные пространственные области. Кроме того, анализируются статистические



**Рис. 1.** Расположение эпицентра землетрясения магнитудой 8.8, произошедшего 29 июля 2025 г. у побережья Камчатки (обозначен маркером), и пространственное распределение 61 связанного с ним форшока и афтершока магнитудой  $\geq 5.5$ , зарегистрированных в период с 29 июля по 29 августа 2025 г.

**Fig. 1.** The location of the epicenter of the July 29, 2025, M8.8 earthquake off Kamchatka (marked) and spatial distribution of related 61  $M \geq 5.5$  foreshocks and aftershocks recorded in the period from July 29 to August 29, 2025.

свойства аналогичных измерений в течение 9 сут после начала исследуемого землетрясения.

На рис. 1 показаны координаты эпицентра рассматриваемого события, а также пространственное распределение форшоков и афтершоков, зарегистрированных в период с 29 июля по 29 августа 2025 г. В анализ включены события с магнитудой не ниже 5.5, и их общее число составило 61.

Цель настоящей работы – выявить и количественно оценить пространственную анизотропию статистических характеристик геомагнитных вариаций в завершающей стадии подготовки сильного землетрясения и обсудить ее физическую интерпретацию с учетом концепции литосферно-атмосферно-ионосферного взаимодействия.

## 2. ПРИМЕНЯЕМЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ

В расчетах используется методика спектрально-вероятностного анализа, развивающая подход, предложенный в работах [Volvach et al., 2022a, 2022b, 2022c, 2023, 2024, 2025a, 2025b, 2026]. Предполагается, что временной ряд измерений Z-компоненты геомагнитного поля  $x(t)$  может быть представлен в виде суммы:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t), \tag{1}$$

где  $x_1(t)$  интерпретируется как фоновая составляющая, обусловленная совокупностью случайных процессов различной природы (магнитосферные вариации, атмосферные эффекты, инструментальный шум), а  $x_2(t)$  – дополнительная случайная составляющая, потенциально связанная с процессами подготовки сильного сейсмического события.

Основная гипотеза метода состоит в статистической независимости (или слабой зависимости) случайных процессов  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ . В этом случае плотность вероятности суммарного сигнала определяется сверткой соответствующих распределений. Для каждой реализации временного ряда строится эмпирическая плотность вероятности. В дискретной форме она записывается как:

$$\rho_{1,2}(w) = \sum_{m=0}^{N-1} P_{1,2}(m)\delta(w - m), \tag{2}$$

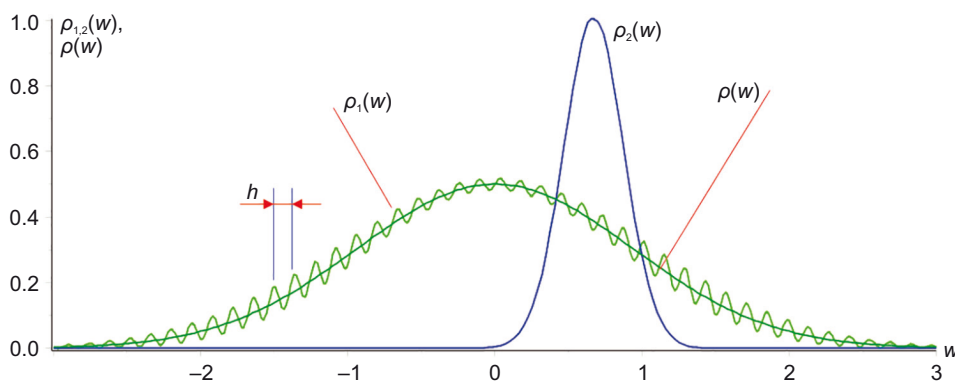


Рис. 2. Плотность вероятности  $\rho_1(w)$ ,  $\rho_2(w)$  и  $\rho(w)$ .  
 Fig. 2. Probability densities  $\rho_1(w)$ ,  $\rho_2(w)$  and  $\rho(w)$ .

где  $P_1(m)$  и  $P_2(m)$  – вероятность попадания значений случайной величины в интервал с индексом  $m$  области значений:

$$x_{\min} + mh \leq x(t) < x_{\min} + (m+1)h, \quad x_{\max} \leq x_{\min} + Nh, \tag{3}$$

где  $h$  – шаг дискретизации,  $N = \left\lceil \frac{x_{\max} - x_{\min}}{h} \right\rceil$ .

Поскольку наблюдаемая величина является суммой двух статистически независимых компонент, ее плотность вероятности определяется сверткой:

$$\rho(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_1(w')\rho_2(w - w')dw'. \tag{4}$$

Если ширина распределения  $\rho_2(w)$  превышает характерный масштаб дискретных флуктуаций, обусловленных конечностью выборки, то операция свертки приводит к сглаживанию мелкомасштабных статистических неоднородностей плотности  $\rho_1(w)$ . Условие такого сглаживания можно записать в виде:

$$2\sigma_2 \geq \left(\frac{2}{3}\right)h, \tag{5}$$

где  $\sigma_2$  – стандарт флуктуаций случайной величины  $x_2(t)$ .

Таким образом, появление дополнительной независимой компоненты  $x_2(t)$  может приводить к изменению степени «шероховатости» эмпирической плотности вероятности. На рис. 2 приведены схематические, изображенные в виде непрерывных функций зависимости  $\rho_1(w)$  (широкая «шероховатая» светло-зеленая кривая, отвечающая слагаемому  $x_1(t)$  в (1)) и  $\rho_2(w)$  (узкая синяя высокая кривая, отвечающая слагаемому  $x_2(t)$ ). Отметим, что «изрезанность» зависимости  $\rho_1(w)$  связана с ограниченным числом отсчетов; аналогичные шероховатости кривой  $\rho_2(w)$  не приводятся с учетом ее узости по сравнению с  $\rho_1(w)$ . Кроме того, здесь так же схематически изображена более гладкая, чем  $\rho_1(w)$ , зависимость  $\rho(w)$  для значений реально измеряемого случайного процесса  $x(t)$  при справедливости условия (5).

Для количественной оценки этого эффекта весь временной ряд разбивается на отрезки реализации длительностью  $N_{1c}$ . Для каждого отрезка аналогично (3),

при замене  $x(t)$  на  $\sin[\xi x(t)]$ , где  $\xi=10^9\text{Тл}^{-1}$ , строится гистограмма распределения значений преобразованной величины  $\sin[\xi x(t)]$ . Переход от непосредственных измерений магнитного  $x(t)$  поля к функции  $\sin[\xi x(t)]$  используется для усиления чувствительности метода к изменениям распределения вблизи краевых значений, поскольку соответствующая плотность вероятности обладает интегрируемыми особенностями при  $w \rightarrow \pm 1$ .

Для каждого отрезка вычисляется величина:

$$\mathcal{L}_l = \sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m P_{m,l}, \tag{6a}$$

где  $P_{m,l}$  – вероятность попадания значения  $\sin[\xi x(t)]$  в интервал с индексом  $m$  для отрезка реализации с индексом  $l$ . Далее определяется статистический функционал:

$$L_0(\mu) = \frac{A}{M} \sum_{l=\mu-M+1}^{\mu} |\mathcal{L}_l|, \tag{6б}$$

где  $\mu$  – номер текущего отрезка реализации,  $M$  – ширина окна усреднения. Кроме того, множитель  $A$  в (6б) принимаем равным 1000. Укажем, что этот нормировочный коэффициент носит полностью технический характер и вводится для перехода к более удобному диапазону области значений. Это требуется для упрощения расчетов при проведении оценок соотношения зависимостей вида (6б), соответствующих разным магнитовариационным станциям.

Функционал  $L_0(\mu)$  характеризует степень неравномерности распределения вероятностей на малых участках диапазона значений сигнала. Уменьшение мелкомасштабных флуктуаций плотности вероятности вследствие выполнения свертки (4) приводит к изменению величины  $L_0(\mu)$ . В этом смысле функционал отражает изменение статистической структуры сигнала, а не его амплитудные характеристики.

Важно подчеркнуть, что метод не предполагает измерения сигнала  $x_2(t)$  напрямую и не требует априор-

ной информации о его форме. Оценка производится исключительно по изменению статистических свойств наблюдаемого временного ряда.

**Геомагнитные условия в анализируемый период.**

В период 16–29 июля 2025 г. геомагнитная активность характеризовалась отдельными интервалами слабых возмущений ( $K_p \leq 5$  продолжительностью не более 3 ч 17 и 23 июля). Корреляционный анализ показал, что значения статистического функционала  $L_0(\mu)$  слабо связаны с индексами  $K_p$  и  $Dst$  ( $|r| < 0.3$ ), что указывает на отсутствие доминирующего влияния магнитосферных процессов на выявленные изменения статистической структуры сигнала.

**3. ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТОВ**

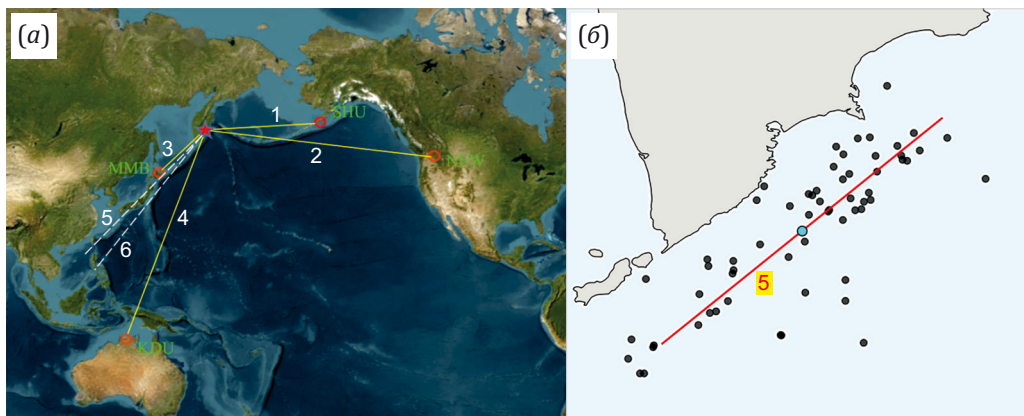
На рис. 3, а, звездочкой обозначен эпицентр землетрясения, красными кружками – положение магнитовариационных станций SHU, NEW, MMB и KDU, по данным которых анализировалась Z-компонента геомагнитного поля. Пунктирная прямая 5 указывает направление оси зоны землетрясения. Прямая 6 соответствует предполагаемому наиболее вероятному направлению токовой системы, формирующейся в процессе подготовки события.

На рис. 3, б, показано пространственное распределение форшоков и афтершоков  $M \geq 5.5$  относительно эпицентра основного события. Видно, что их вытянутость согласуется с осью зоны землетрясения (красная прямая 5 на рис. 3, а).

Далее на рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 рассматриваются зависимости вида:

$$L(n) = L_0 \left( \left\lfloor \frac{3600n}{N_1} \right\rfloor \right), \tag{7}$$

где  $n$  – время в часах. Здесь учитывается, что поскольку частота дискретизации составляет 1 Гц, длительность  $\Delta t$  одного отрезка реализации (в секундах)



**Рис. 3.** Расположение эпицентра землетрясения и четырех рассматриваемых магнитовариационных станций (а) и карта форшоков и афтершоков с магнитудой не менее 5.5 (б). Эпицентр основного события отмечен бирюзовым кружком. Красная прямая 5 отвечает оси зоны землетрясения.

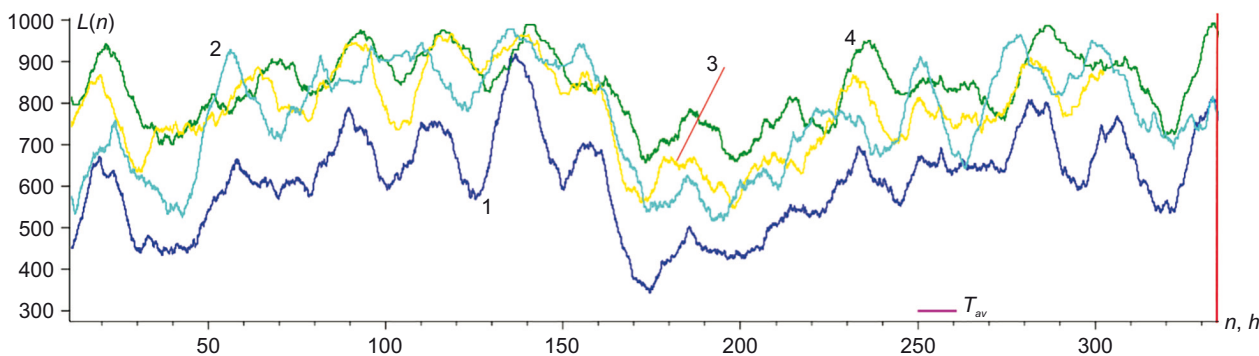
**Fig. 3.** The location of the earthquake epicenter and four magnetovariation stations considered (а) and the map of foreshocks and aftershocks with magnitude not less than 5.5 (б). The main shock epicenter is circled in turquoise. Red straight line 5 corresponds to the earthquake zone axis.

численно равна числу отсчетов  $N_1$  в пределах одного отрезка.

На рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 приведены зависимости  $L(n)$ , построенные по методике спектрально-вероятностного анализа для данных станций, показанных на рис. 3. Параметры  $N_1$ ,  $M$ , и  $h$  (см. формулы (6)–(7)) варьировались в заданных диапазонах с использованием генератора псевдослучайных чисел. При

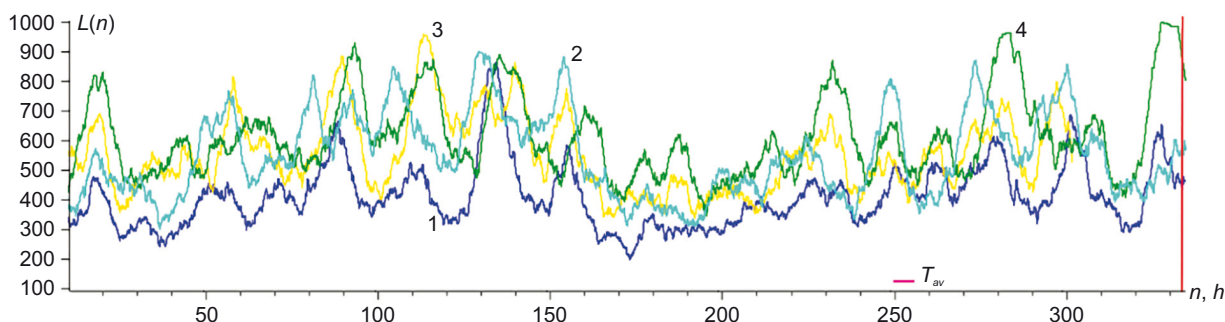
этом для повышения наглядности значение  $N_1$  возрастает от рисунка к рисунку и округляется до ближайшего числа, кратного 25. Значения  $M$  округляются до ближайшего целого, кратного 5.

На всех рисунках измерениям магнитометров SHU (Алеутские острова), NEW (запад материковой части США), MMB (север Японии) и KDU (северная часть Австралии) отвечает синяя кривая 1, бирюзовая кривая 2,



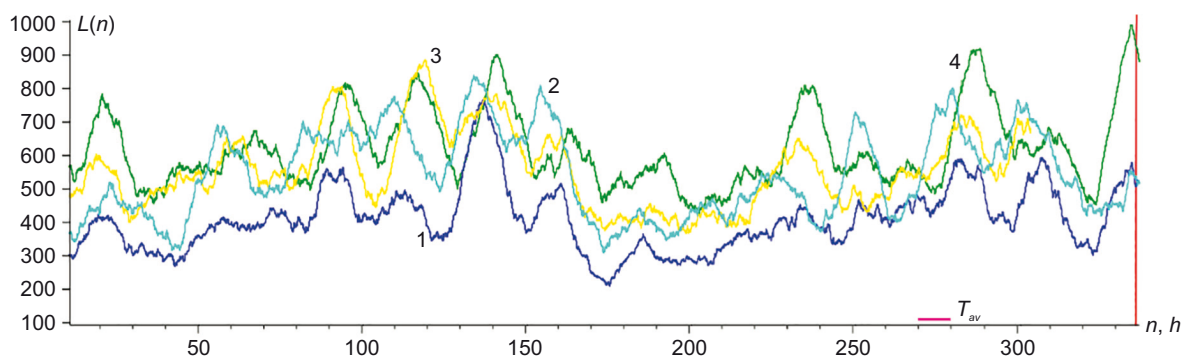
**Рис. 4.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4). Values  $N_1=125, M=325, h=0.19$ . Интервал усреднения  $T_{av}=11h$ .

**Fig. 4.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements. Values  $N_1=125, M=325, h=0.19$ . Averaging interval  $T_{av}=11h$ .



**Рис. 5.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4). Values  $N_1=250, M=85, h=0.15$ . Интервал усреднения  $T_{av}=6h$ .

**Fig. 5.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements. Values  $N_1=250, M=85, h=0.15$ . Averaging interval  $T_{av}=6h$ .

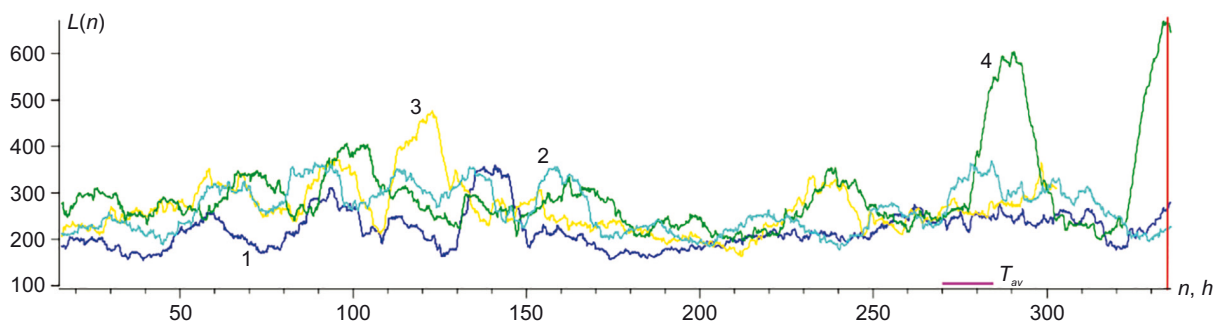


**Рис. 6.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4). Values  $N_1=300, M=125, h=0.17$ . Интервал усреднения  $T_{av}=10h$ .

**Fig. 6.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements. Values  $N_1=300, M=125, h=0.17$ . Averaging interval  $T_{av}=10h$ .

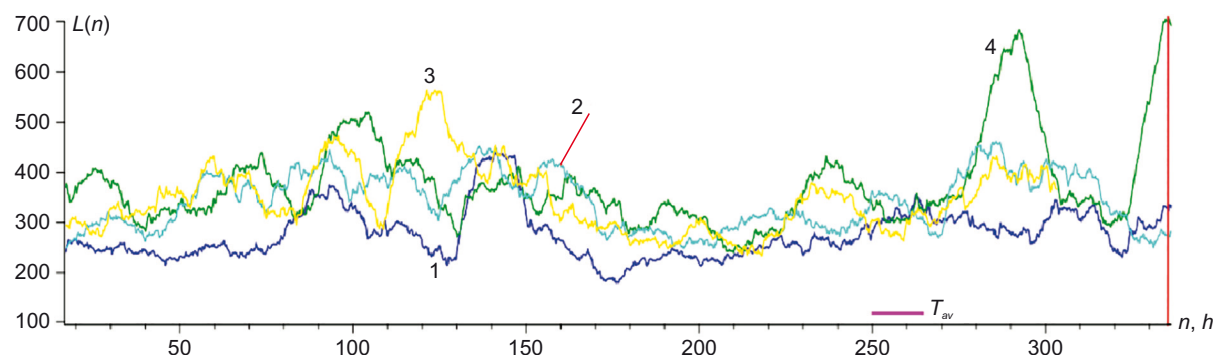
желтая кривая 3 и зеленая кривая 4 соответственно. Во всех случаях рассматриваются измерения Z-компоненты магнитного поля. На рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, за исключением рис. 12, б, рассматриваемый временной интервал охватывает период с 16 по 29 июля 2025 г., включая момент начала землетрясения магнитудой 8.8 (29 июля 2025 г., 23:24:50 UTC). На рис. 12, б, с целью демонстрации типичного поведения зависи-

мостей  $L(n)$  после землетрясения период наблюдений продолжен до 23:59:59 7 августа 2025 г. Горизонтальная ось соответствует времени в часах, отсчитанному от 00:00:00 16 июля 2025 г. На каждом рисунке указана величина  $T_{av}=MN_1$  характеризующая суммарную длительность интервала усреднения (в часах) (см. рис. 6, б). На рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 вертикальная красная прямая, проведенная при значении горизонтальной



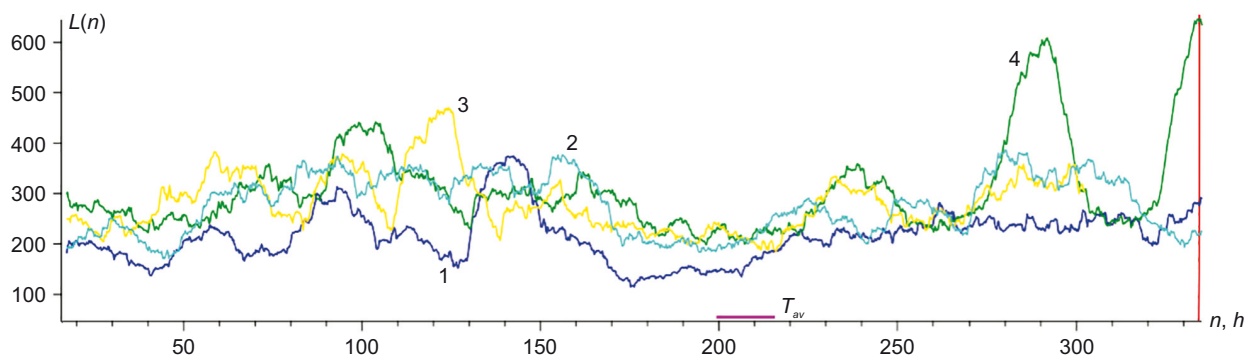
**Рис. 7.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4). Values  $N_1=450, M=120, h=0.07$ . Интервал усреднения  $T_{av}=15h$ .

**Fig. 7.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements. Values  $N_1=450, M=120, h=0.07$ . Averaging interval  $T_{av}=15h$ .



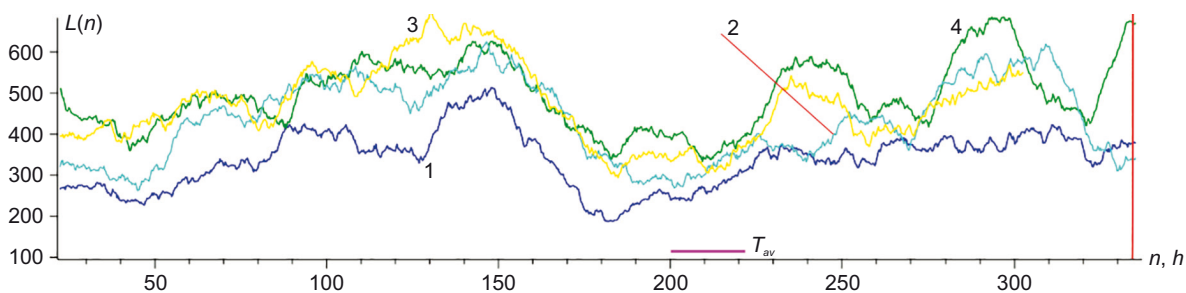
**Рис. 8.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4). Values  $N_1=600, M=100, h=0.12$ . Интервал усреднения  $T_{av}=16h$ .

**Fig. 8.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements. Values  $N_1=600, M=100, h=0.12$ . Averaging interval  $T_{av}=16h$ .



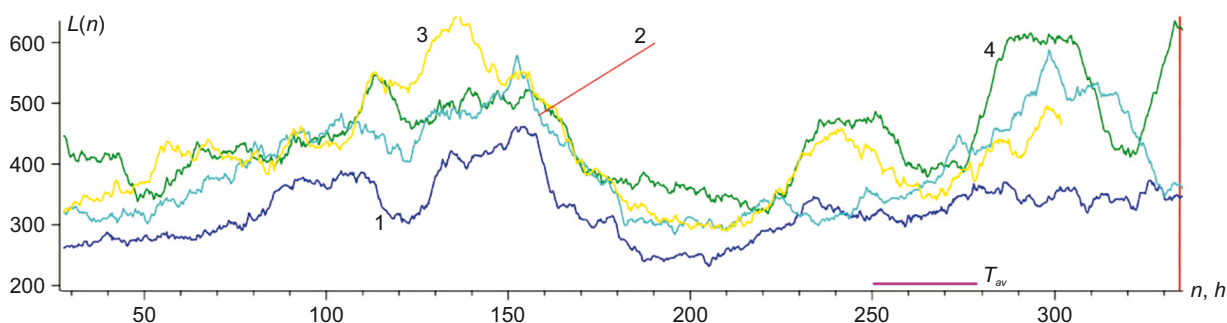
**Рис. 9.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4). Values  $N_1=750, M=80, h=0.1$ . Интервал усреднения  $T_{av}=17h$ .

**Fig. 9.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements. Values  $N_1=750, M=80, h=0.1$ . Averaging interval  $T_{av}=17h$ .



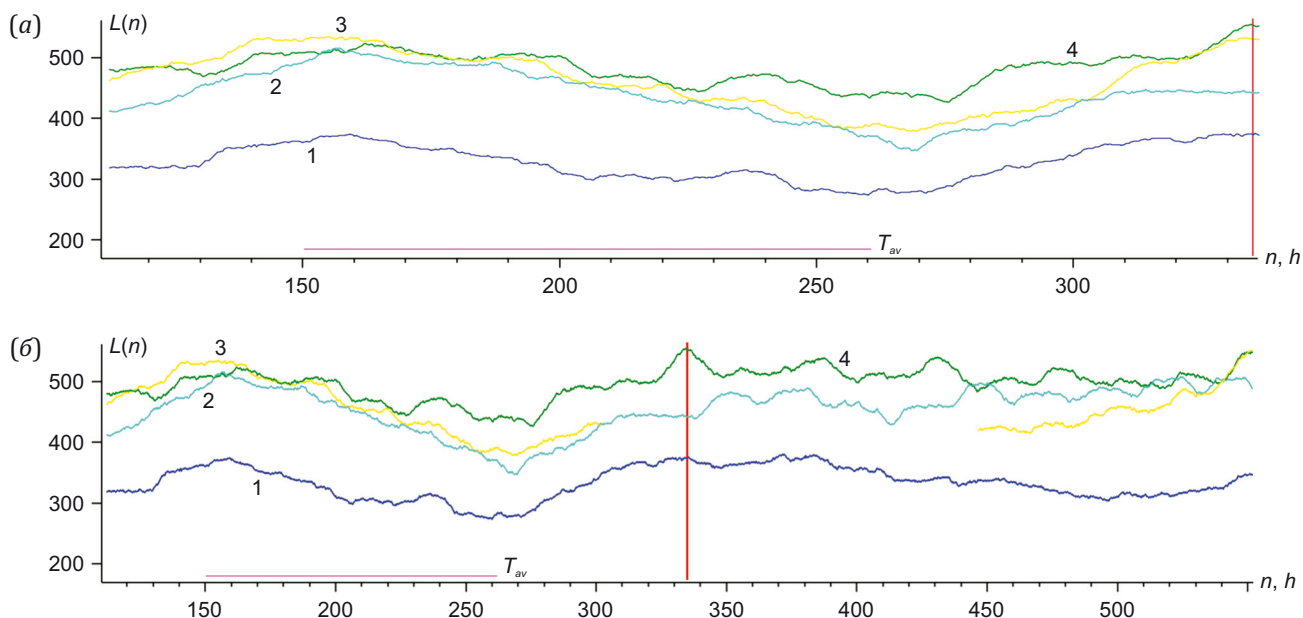
**Рис. 10.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4). Values  $N_1=925, M=85, h=0.25$ . Интервал усреднения  $T_{av}=22h$ .

**Fig. 10.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements. Values  $N_1=925, M=85, h=0.25$ . Averaging interval  $T_{av}=22h$ .



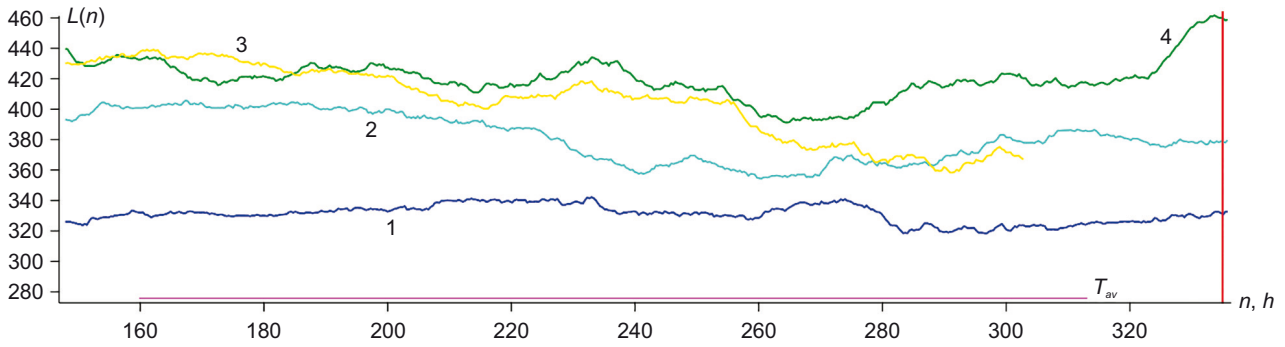
**Рис. 11.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4). Values  $N_1=1000, M=105, h=0.22$ . Интервал усреднения  $T_{av}=29h$ .

**Fig. 11.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements. Values  $N_1=1000, M=105, h=0.22$ . Averaging interval  $T_{av}=29h$ .



**Рис. 12.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4) для интервала в 14 суток (а) и в 23 суток (б) от момента начала отсчета. Values  $N_1=1075, M=375, h=0.27$ . Интервал усреднения  $T_{av}=111h$ .

**Fig. 12.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements for 14-day (a) and 23-day (б) intervals from the reference time. Values  $N_1=1075, M=375, h=0.27$ . Averaging interval  $T_{av}=111h$ .



**Fig. 13.** Зависимости  $L(n)$ , соответствующие измерениям магнитометров SHU (синяя кривая 1), NEW (бирюзовая кривая 2), MMB (желтая кривая 3) и KDU (зеленая кривая 4). Values  $N_1=1250, M=425, h=0.23$ . Интервал усреднения  $T_{av}=148h$ .

**Fig. 13.**  $L(n)$  relationships corresponding to the SHU (blue curve 1), NEW (turquoise curve 2), MMB (yellow curve 3) and KDU (green curve 4) magnetometer measurements. Values  $N_1=1250, M=425, h=0.23$ . Averaging interval  $T_{av}=148h$ .

**Таблица 1.** Значения  $|\mathcal{L}_i|$ , см. (8), характеризующие отношения средних значений функционалов  $L_0(n)$  для магнитометров SHU и MMB, а также их усреднение  $\bar{\mathcal{L}} = \langle \mathcal{L}_i \rangle_{i=4...13}$ , см. (9)

**Table 1.**  $|\mathcal{L}_i|$  values, see (8), characterizing the ratios of average values of functionals  $L_0(n)$  for the SHU and MMB magnetometers, and their averaging  $\bar{\mathcal{L}} = \langle \mathcal{L}_i \rangle_{i=4...13}$ , see (9)

Параметр	рис. 4	рис. 5	рис. 6	рис. 7	рис. 8	рис. 9	рис. 10	рис. 11	рис. 12	рис. 13
$ \mathcal{L}_i $	1.314	1.397	1.403	1.257	1.294	1.38	1.386	1.303	1.428	1.220
$\langle \mathcal{L}_i \rangle_{i=4...13}$	1.338									

координаты  $n \approx 335.4$  ч, указывает на момент начала события (28.07.2025 г. в 23:24:50 UTC). При этом на рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 изображены в виде сплошных горизонтальных малых розовых отрезков интервалы времени  $T_{av} = MN_1$ , равные длительности интервалов времени, по которым всякий раз рассчитывались значения функционала  $L(n)$ .

Следует отметить, что 28 июля 2025 г. в 15:55 UTC на станции MMB произошел продолжительный инструментальный сбой. В связи с этим на рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 кривая для MMB обрывается за 32 часа до момента основного события. Соответствующий анализ для этой станции выполнен на интервале  $T_{mmb} = 303$  ч 55 мин. На рис. 12, 6, зависимость для MMB далее «восстанавливается» по истечении интервала времени  $T_{av} = 111$  ч после начала нормальной работы указанного магнитометра.

В табл. 1 приведены соотношения:

$$\mathcal{L}_i = \frac{\sum_{\mu=M}^{N_{mmb}} L_0^{mmb}(\mu)}{\sum_{\mu=M}^{N_{mmb}} L_0^{shu}(\mu)}, \quad (8)$$

где  $L_0^{mmb}(\mu)$  и  $L_0^{shu}(\mu)$  – значения функционала  $L_0(\mu)$  для станций MMB и SHU. Верхний предел суммирования

определяется как  $N_{mmb} = \left\lfloor \frac{T_{mmb}}{N_1} \right\rfloor$ , где  $T_{mmb}$  выражено в

секундах, а квадратные скобки обозначают целую часть числа. Таким образом, величина (8) представляет со-

бой отношение средних значений функционала для двух станций на совпадающем временном интервале. Среднее по десяти зависимостям  $L_0(\mu)$  ( $i=4,5...13$ ), отвечающим рассматриваемым наборам значений  $N_1, M, h$ , отвечающим рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, равно:

$$\bar{\mathcal{L}} = \langle \mathcal{L}_i \rangle_{i=4...13} = 1.338. \quad (9)$$

Полученные значения свидетельствуют о наличии устойчивых различий статистических характеристик геомагнитных вариаций на пространственно разнесенных станциях в рассматриваемый период. Принципиально важно, что анализ основан не на выявлении амплитудных аномалий, а на сравнении вероятностной структуры временных рядов. Это позволяет фиксировать изменения формы распределения и мелкомасштабной структуры флуктуаций, остающиеся незаметными при традиционном амплитудном подходе.

Используемый функционал характеризует степень равномерности распределения вероятностей и, тем самым, чувствителен к изменению статистической «структурированности» сигнала. По сравнению с методами поиска экстремумов такой подход менее чувствителен к единичным импульсным возмущениям и обладает большей устойчивостью к выбросам.

Глобальные вариации геомагнитного поля в значительной степени определяются магнитосферными процессами [Campbell, 2003]. В анализируемый период наблюдались отдельные интервалы умеренной геомагнитной активности. Однако индекс Кр не превышал 5

более чем в течение 3 ч; корреляция между функционалом  $L_0(\mu)$  и индексами Kp и Dst оказалась слабой ( $|r| < 0.3$ ); исключение интервалов повышенной активности не устраняет пространственную неоднородность функционала. Это указывает на отсутствие доминирующего влияния магнитосферных возмущений на выявленный эффект.

Прямое магнитное поле от гипоцентральных источников на межконтинентальных расстояниях пренебрежимо мало, что исключает интерпретацию результатов как следствие локального токового источника в литосфере. Более правдоподобным представляется механизм крупномасштабной модуляции ионосферных токовых систем в рамках LAIC [Pulinets, Ouzounov, 2011; Ouzounov et al., 2018].

Согласно этой модели, накопление тектонических напряжений может сопровождаться изменением электрических свойств приземной атмосферы (в том числе за счет радоновой эмиссии и активации носителей заряда в породах) [Freund, 2002, 2011]. Модификация вертикального электрического тока глобальной электрической цепи способна приводить к перераспределению ионосферных токов, что проявляется как пространственно неоднородные изменения геомагнитных вариаций.

Одновременное проявление эффекта на удаленных станциях согласуется с гипотезой крупномасштабной перестройки токовых систем, а не локальных инструментальных или региональных факторов.

Вместе с тем следует отметить ограничения проведенного исследования. Анализ выполнен для одного события, что не позволяет делать окончательные выводы об универсальности выявленного эффекта. Кроме того, необходимы дополнительные контрольные периоды, не связанные с сильными землетрясениями, для оценки вероятности ложных срабатываний метода.

Таким образом, полученные результаты можно интерпретировать как свидетельство существования крупномасштабного геомагнитного отклика, проявляющегося в изменении статистической структуры вариаций магнитного поля на заключительной стадии подготовки сильного землетрясения. Окончательное подтверждение природы данного эффекта требует расширения выборки событий и привлечения многопараметрических наблюдений.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При изучении рис. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 приходим к следующим выводам.

1. На протяжении не менее 90 % общей продолжительности интервала времени, рассматриваемого на любом из рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 перед началом исследуемого землетрясения, синяя кривая 1 для зависимости  $L(n)$ , построенной по измерениям алеутского магнитометра SHU, проходит значительно ниже трех остальных таких зависимостей, отвечающих из-

мерениям магнитовариационных станций NEW (бирюзовая кривая 2), ММВ (желтая кривая 3) и КДУ (зеленая кривая 4). С учетом свойств применяемого статистического функционала  $L(n)$  этот факт свидетельствует о значительно большем влиянии входящего в (1) случайного слагаемого  $x_2(t)$ , независимого от  $x_1(t)$ , для станции SHU, по сравнению с остальными магнитометрами. Напомним, что величина  $L(n)$  обратно пропорциональна эффективной амплитуде независимого случайного процесса  $x_2(t)$ . Этот феномен имеет место как для случая относительно малых интервалов времени  $T_{av}$ , по которым рассчитываются значения  $L(n)$  (см. рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11), так и при условии соизмеримости длительности  $T_{av}$  с полным промежутком измерений (см. рис. 12; рис. 13). В последнем случае указанный эффект выражен особенно ярко. Вначале сопоставим результаты для магнитометров SHU и ММВ, расположенных относительно близко к точке эпицентра и находящихся от нее на соизмеримых расстояниях.

2. В табл. 1 приведены значения  $\mathcal{L}_i$ , см. (8), характеризующие отношения средних значений функционалов  $L(n)$  для магнитометров SHU и ММВ, а также усреднение  $\bar{\mathcal{L}} = \langle \mathcal{L}_i \rangle_{i=4..13}$ . С учетом случайного выбора величин  $N_1$ ,  $M$  и  $h$ , определяющих свойства  $L(n)$ , дополнительное усреднение (9) может рассматриваться как эффективное значение соотношений двух этих функционалов, усредненное по ансамблю из десяти наборов параметров  $N_1$ ,  $M$  и  $h$ . Следует принять во внимание малый относительный разброс значений  $\mathcal{L}_i$ , приведенных в табл. 1.

Как было указано выше, согласно статистическому смыслу зависимости  $L(n)$ , ее значения с высокой вероятностью обратно пропорциональны эффективной амплитуде случайного процесса  $x_2(t)$ , связанного с электромагнитными процессами, ассоциированными с подготовкой землетрясения и вносящими вклад в вариации исследуемой Z-компоненты магнитного поля, поэтому полученное в (9) значение  $\bar{\mathcal{L}}$  может быть интерпретировано как приближенное соотношение

$$\bar{\mathcal{L}} = \frac{x_{2,SHU}^{eff}}{x_{2,MMB}^{eff}} \tag{10}$$

эффективных амплитуд  $x_{2,SHU}^{eff}$  для станции SHU и  $x_{2,MMB}^{eff}$  для магнитометра ММВ.

Учтем, что в рамках эффективного описания наблюдаемого магнитного отклика соотношение типа Био – Савара – Лапласа может быть использовано для параметризации зависимости амплитуды  $x_2(t)$  от расстояния и ориентации источника:

$$x_2(t) \sim \frac{I_{eff} \sin(\alpha)}{R^2}. \tag{11}$$

Здесь  $I_{eff}$  и  $R$  – соответственно эффективная амплитуда указанных токов в зоне готовящегося гипоцентра,  $R$  – расстояние от магнитовариационной до точки будущего эпицентра. При этом аргумент  $\alpha$  – неизвестный угол между эффективным направлением линий

этих токов, обозначенным прямой 6 на рис. 3, а, и направлением на соответствующий магнитометр.

Следует подчеркнуть, что использование соотношения Био – Савара – Лапласа в данном разделе носит характер упрощенной геометрической оценки. Мы не предполагаем существования в ионосфере протяженного прямолинейного тока в строгом физическом смысле. В рамках концепции LAIC перераспределение токовых систем Sq, DP2 и связанных с ними крупномасштабных токов имеет пространственно сложный, протяженный характер, который не может быть описан моделью одиночного проводника.

Тем не менее для целей анализа ориентации эффективной токовой структуры, выявленной по статистическим свойствам геомагнитных вариаций, достаточно рассматривать не детальную конфигурацию токов, а лишь результирующее направление магнитного отклика. В этом ограниченном контексте модель прямолинейного тока служит удобным параметрическим приближением, позволяющим оценить ориентацию анизотропной структуры и сопоставить ее с направлением оси сейсмоактивной зоны.

Таким образом, упрощенная геометрическая модель не противоречит LAIC-механизму: LAIC задает физическую природу крупномасштабных изменений токовых систем, тогда как соотношение Био – Савара используется исключительно для оценки геометрии выявленного магнитного отклика. Такое сочетание уровней описания является согласованным и методологически корректным.

В этом смысле соотношение (11) следует рассматривать как эффективное геометрическое приближение, описывающее результирующее пространственное распределение источников. Реальный же механизм формирования наблюдаемых вариаций может включать перераспределение ионосферных токовых систем в рамках LAIC, а также возможные эффекты распространения и резонансного усиления геомагнитных возмущений, аналогичные обсужденным в работе [Volvach et al., 2025b]. Такой подход не предполагает жесткого выбора единственного физического механизма и допускает, что наблюдаемый эффект является результатом совокупного действия нескольких процессов различной природы.

Как следует из рис. 3, а, японский магнитометр MMB расположен от эпицентра на расстоянии  $R_{MMB}=1600$  км, а алеутская магнитовариационная станция SHU – существенно далее, на расстоянии  $R_{SHU}=2800$  км. Обозначим  $\alpha_{MMB}$  угол  $\varphi_{3-5}$  между прямой 3, задающей направление от точки эпицентра на магнитометр MMB, и эффективным направлением указанных токов в области гипоцентра, обозначенным на рис. 3, а, пунктирной прямой 6. По аналогии, обозначим  $\alpha_{SHU}$  угол между прямой 1, отвечающей направлению от точки эпицентра на магнитометр SHU, и указанной прямой 6. Тогда получаем:

$$\frac{x_{2,SHU}^{eff}}{x_{2,MMB}^{eff}} = \frac{\sin(\alpha_{SHU})}{\sin(\alpha_{MMB})} \left( \frac{R_{MMB}}{R_{SHU}} \right)^2 = \bar{L}. \tag{12}$$

Отметим, что угол между направлениями прямых 1 и 3 на рис. 3, а, оценивается как  $\varphi_{1-3}=158^\circ$ , а также что

$$\alpha_{SHU} = \varphi_{1-3} - \alpha_{MMB}. \tag{13}$$

Здесь при расчетах было учтено, что при географических расстояниях, не превышающих половины радиуса Земли, можем пренебречь разницей между углами на сфере и их проекциями на плоскости, проходящими через трехмерные декартовы геометрические координаты соответствующих географических объектов.

Тогда для угла  $\alpha_{MMB}$  получаем уравнение:

$$\frac{\sin(\varphi_{1-3} - \alpha_{MMB})}{\sin(\alpha_{MMB})} = \bar{L} \left( \frac{R_{SHU}}{R_{MMB}} \right)^2. \tag{14}$$

Его решение, записанное в градусах, составляет

$$\alpha_{MMB} \approx 7^\circ. \tag{15}$$

Эта величина близка к углу  $\varphi_{3-5} \approx 4^\circ$  между осью зоны землетрясения (ей соответствует пунктирная прямая 5 на рис. 3, а, и эквивалентная ей красная линия 5 на рис. 3, б) и направлением от точки эпицентра на магнитометр MMB (прямая 3 на рис. 3, а).

3. Факт соизмеримости углов  $\alpha_{MMB} = \varphi_{3-6}$  и  $\varphi_{3-5}$  можно рассматривать как элемент верификации предлагаемой методики расчетов. Одновременно с этим полученные результаты позволяют говорить о существовании сильной анизотропии направлений токов между краями вновь образующихся сетей локальных трещин и разломов. В данном случае направление таких токов оказывается почти параллельным оси зоны землетрясения. Это означает, что эффективная ориентация указанных трещин близка к перпендикулярной по отношению к данной оси.

4. Магнитометр NEW, которому на каждом из рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 соответствует бирюзовая кривая 2, удален от точки эпицентра на расстояние  $R_{NEW} = 5300$  км. Эта величина приблизительно в 3.5 раза превосходит расстояние от эпицентра до станции MMB. Тем не менее на всех этих рисунках значения функционалов  $L(n)$  для станций MMB и NEW вполне сопоставимы, а отвечающие им кривые 2 и 3 в большинстве случаев многократно пересекаются. Этот фактор также может быть объяснен на основании много большего значения присутствующего в (11) множителя  $\sin(\alpha)$  для угла  $\alpha = \alpha_{NEW}$  (определенного по аналогии с  $\alpha_{SHU}$  и  $\alpha_{MMB}$ ) между прямой 6 и направлением на магнитометр NEW, по сравнению со случаем  $\alpha = \alpha_{MMB}$ . С учетом (15) получаем, что значение  $\sin(\alpha_{NEW}) \gg \sin(\alpha_{MMB})$ , поскольку в таком случае значения  $x_2(t)$  вида (11) являются соизмеримыми для двух этих магнитовариационных станций. Полученный результат также может рассматриваться как аргумент в пользу вывода об анизотропии токов в зоне подготовки рассматриваемого землетрясения.

5. Австралийский магнитометр KDU, которому на каждом из рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 соответствует зеленая кривая 4, удален от точки эпицентра на

расстояние  $R_{\text{KDU}}=7700$  км, что соизмеримо с четвертью длины экватора. Кроме собственно факта уменьшения с расстоянием для магнитных полей, генерируемых в районе будущего гипоцентра, на таком удалении от него с высокой вероятностью проявляются эффекты ослабления и геометрического экранирования сигнала, связанные с кривизной Земли и пространственным распределением токовых систем. Этот вывод подтверждается, в частности, тем, что на рис. 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 в последние 2–3 сут перед началом события кривая 4 проходит существенно выше остальных зависимостей, что означает значительное уменьшение размаха флуктуаций независимого слагаемого  $x_2(t)$  для измерений станции KDU по сравнению с другими магнитометрами. Особенно показательным этот эффект проявляется на рис. 12, 13, для которых интервал  $T_{av}$  составляет более 5 сут и соизмерим с общей продолжительностью всего рассматриваемого промежутка измерений. Таким образом, свойства статистики данных рассматриваемой австралийской магнитовариационной станции также согласуются с логикой рассматриваемого подхода.

6. В итоге на основании проведенных расчетов приходим к выводу о высокой степени анизотропии направлений токов, которые имели место в области подготовки землетрясения в период последних двух недель перед его началом. Этот вывод означает, в частности, что предлагаемая методика спектрально-вероятностного анализа, при условии создания сети магнитовариационных станций с интервалом 200–300 км вдоль зон основных разломов и с учетом результатов работ [Volvach et al., 2022a, 2022b, 2022c, 2023, 2024, 2025a, 2025b, 2026], может рассматриваться как потенциально применимый подход к оценке времени и пространственной локализации области подготовки сильного землетрясения.

7. На рис. 12, б, кроме того же, что и на остальных рисунках, интервала в 335.4 ч перед событием, приведен типичный вид рассматриваемых зависимостей  $L(n)$  для следующих 9 сут после начала данного землетрясения вплоть до 23:59:59 7 августа 2025 г. Выше было отмечено, что в данном случае кривая  $L(n)$  для ММВ «восстанавливается» по истечении интервала времени  $T_{av}=111$  ч после начала нормальной работы магнитометра ММВ. Как следует из анализа данного рисунка, через время порядка 6 сут после начала события зависимости  $L(n)$  для магнитометров SHU, NEW и KDU вновь начинают группироваться, как это было и за время также порядка 6 сут перед землетрясением. Этот факт может быть интерпретирован как следствие уменьшения в (1) эффективной амплитуды независимого случайного процесса  $x_2(t)$ , который связан с влиянием процесса подготовки рассматриваемого сильного сейсмического события. В рамках применяемой методики подобное группирование может быть объяснено переходом к «обычной» ситуации, когда зависимости  $L(n)$  для трех этих магнитометров в основном определяются фоновым шумом.

При этом кривая  $L(n)$  для магнитометра SHU на рис. 12, б, по-прежнему проходит существенно ниже трех других кривых. Этот факт объясняется тем, что основные токи в области вновь возникших разломов (число которых продолжает увеличиваться с учетом значительных афтершоков в течение месяца после начала главного события) по-прежнему направлены квазиперпендикулярно направлению на точку расположения магнитовариационных станций SHU и NEW. При этом для магнитометра NEW этот эффект нивелируется с учетом намного большего расстояния от эпицентра, чем для SHU. Таким образом, поведение совокупности кривых  $L(n)$  для всех четырех рассматриваемых магнитометров может быть непротиворечивым образом описано в рамках логики используемого подхода.

8. В рамках применяемой методики с высокой вероятностью становятся «читаемыми» процессы, происходящие в зоне подготовки предстоящего сейсмического события высокой магнитуды. При этом удается не только оценить отношение эффективных значений, отвечающее разным станциям независимого слагаемого  $x_2(t)$ , см. (1), связанное с процессом подготовки землетрясения, и на основе таких оценок определить характерное направление токов в области будущего гипоцентра. Не менее важным результатом является формулирование специализированного «языка», т.е. системы логически связанных понятий и определений, позволяющих непротиворечивым образом описывать процессы подготовки приближающегося сейсмического события в режиме, близком к реальному времени.

Пространственно направленные особенности электромагнитных вариаций обсуждались и в связи с другими сильными землетрясениями, однако их интерпретация остается неоднозначной. В частности, детальный анализ данных перед землетрясением Лома-Приета 1989 г. показал, что ранее заявленный магнитный предвестник может быть объяснен обычными магнитосферными вариациями [Thomas et al., 2009]. На этом фоне выявленный в настоящей работе эффект представляет собой статистически устойчивую особенность, проявляющуюся согласованно на пространственно разнесенных станциях и сохраняющуюся при варьировании параметров обработки, что отличает его от ранее обсуждавшихся одиночных амплитудных аномалий.

Дополнительным аргументом в пользу физической значимости обнаруженного эффекта является его временная эволюция: после основного сейсмического события наблюдается постепенное ослабление пространственной анизотропии и тенденция к сближению зависимостей  $L(n)$  на различных станциях. Такое поведение согласуется с уменьшением вклада дополнительной компоненты  $x_2(t)$ , связанной с процессом подготовки землетрясения, и указывает на возврат статистических характеристик геомагнитных вариаций к квазифоновому состоянию.

В отличие от подходов, ориентированных на поиск отдельных экстремальных отклонений, применяемый

здесь спектрально-вероятностный функционал  $L(n)$  характеризует изменение статистической структуры вариаций. Такой подход менее чувствителен к кратковременным магнитосферным возмущениям и, тем самым, потенциально снижает риск ложной интерпретации отдельных событий, на который указывали критические исследования [Geller, 1997; Thomas et al., 2009; Masci, Thomas, 2015; Masci et al., 2015].

Следует отметить, что проблема достоверности предвестников землетрясений, включая электромагнитные, остается предметом активной научной дискуссии. Классические работы (например [Geller, 1997]) подчеркивают фундаментальные ограничения предсказуемости сейсмических событий и необходимость строгой верификации любых заявляемых предвестников. Ряд исследований указывает на трудности отделения возможных литосферных сигналов от вариаций, обусловленных космической погодой и магнитосферной динамикой [Masci, Thomas, 2015; Masci et al., 2015].

В этом контексте полученные результаты следует рассматривать как статистически устойчивые особенности геомагнитных вариаций, выявленные на разнесенных станциях и воспроизводимые при изменении параметров анализа. Их интерпретация требует дальнейшей проверки на независимых событиях, что является необходимым условием для оценки практической применимости предлагаемого подхода, в том числе для задач мониторинга и пространственной локализации зон подготовки сильных землетрясений.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе методики спектрально-вероятностного анализа исследованы статистические свойства вариаций Z-компоненты геомагнитного поля в течение 14 суток, предшествовавших землетрясению магнитудой 8.8, произошедшему 29 июля 2025 г. у побережья Камчатки.

Анализ показал наличие устойчивых различий значений статистического функционала на пространственно разнесенных магнитовариационных станциях. Выявленные особенности носят систематический характер и сохраняются при варьировании параметров расчета ( $N_1$ ,  $M$ ,  $h$ ), что указывает на их относительную устойчивость по отношению к выбору параметризации метода.

В рамках предложенной интерпретации полученные соотношения могут быть согласованы с моделью направленной (анизотропной) эффективной токовой структуры, формирующейся в зоне подготовки землетрясения. Простая геометрическая оценка, основанная на соотношении типа Био – Савара – Лапласа, приводит к значениям угловой ориентации, согласующимся с направлением оси сейсмоактивной зоны. Данное совпадение следует рассматривать как косвенное подтверждение внутренней согласованности примененного подхода.

Полученные результаты демонстрируют принципиальную чувствительность спектрально-вероятно-

стного подхода к изменениям статистической структуры геомагнитных вариаций в предсейсмический период. При дальнейшем подтверждении на независимых событиях данный метод может рассматриваться как инструмент для анализа пространственной структуры возможных предсейсмических аномалий и уточнения области подготовки сильных землетрясений.

Авторы хотели бы подчеркнуть, что сформулированные в статье выводы относятся к одному рассмотренному землетрясению, которое было выбрано с учетом его эксклюзивно высокой магнитуды. Повторение полученных результатов для ряда других подобных сейсмических событий позволит сделать вывод о принципиальной возможности пространственной локализации области предстоящего сильного землетрясения при помощи предлагаемой методики. С учетом продолжающейся научной дискуссии о достоверности электромагнитных предвестников дальнейшая проверка метода на независимых данных остается ключевым условием для оценки его практической применимости.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты, представленные в данной статье, основаны на данных, собранных в магнитных обсерваториях. Авторы благодарят национальным институтам, которые их поддерживают, и INTERMAGNET за содействие внедрению высоких стандартов работы магнитных обсерваторий ([www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org)). Л.П. Коган, В.Б. Штенберг и Е.А. Ревунова признательны Нижегородскому государственному архитектурно-строительному университету за финансовую поддержку, предоставленную в рамках гранта «Фундамент будущего».

## 7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Campbell W.H., 2003. Introduction to Geomagnetic Fields. Cambridge University Press, 303 p.
- Freund F., 2002. Charge Generation and Propagation in Igneous Rocks. Journal of Geodynamics 33 (4–5), 545–570. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00015-7).
- Freund F., 2011. Pre-Earthquake Signals: Underlying Physical Processes. Journal of Asian Earth Sciences 41 (4–5), 383–400. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.009>.

Geller R.J., 1997. Earthquake Prediction: A Critical Review. *Geophysical Journal International* 131 (3), 425–450. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x>.

Hayakawa M., 2015. *Earthquake Prediction with Radio Techniques*. John Wiley & Sons, Singapore, 294 p. <https://doi.org/10.1002/9781118770368>.

Hayakawa M., Fujinawa Y., 1994. *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. Terra Scientific Publishing, Tokyo, Japan, 677 p.

Liu J.Y., 2009. Earthquake Precursors Observed in the Ionospheric F-Region. In: M. Hayakawa (Ed.), *Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Transworld Research Network, Trivandrum, p. 187–204.

Masci F., Thomas J., 2015. Are There Any New Findings in the Search for ULF Magnetic Precursors to Earthquakes? *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120 (12), 10289–10304. <https://doi.org/10.1002/2015JA021336>.

Masci F., Thomas J.N., Villani F., Secan J.A., Rivera N., 2015. On the Onset of Ionospheric Precursors 40 min Before Strong Earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120 (2), 1383–1393. <https://doi.org/10.1002/2014JA020822>.

Ouzounov D., Pulinets S., Hattori K., Taylor P. (Eds), 2018. *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*. American Geophysical Union, 384 p. <https://doi.org/10.1002/9781119156949>.

Pulinets S.A., Ouzounov D., 2011. Lithosphere – Atmosphere – Ionosphere Coupling (LAIC) Model – An Unified Concept for Earthquake Precursors Validation. *Journal of Asian Earth Sciences* 41 (4–5), 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.005>.

Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J.S., 2009. On the Reported Magnetic Precursor of the 1989 Loma Prieta Earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 173 (3–4), 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.11.014>.

Volvach A., Celik C., Kogan L., Volvach L., 2025a. On the Extreme Values of the Correlator of Topological Similarity of Functionals from the Statistics of Geomagnetic Field Measurements for Spatially Separated Magnetometers in the Period Before the 06/02/2023 Earthquake of Magnitude 7.8 in Eastern Turkey. *Romanian Reports in Physics* 77 (1), 704. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2025.77.704>.

Volvach A., Kogan L., Volvach L., Kanonidi K., Bubukin I., Revunova E., 2023. On the Topological Similarity of the Functionals from the Statistics of Magnetic Field Measure-

ments Before the Earthquake on November 3, 2022 in the Gura Teghii, Romania Region. *Romanian Reports in Physics* 75 (4), 707. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2023.75.707>.

Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., Bubukin I.T., Shtenberg V.B., Volvach L.N., Biazitov D.T., 2022a. Statistical Precursors of a Strong Earthquake on April 6, 2009 on the Apennine Peninsula. *Heliyon* 8 (8), e10200. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10200>.

Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., Nadezhka L.I., Bubukin I.T., Boborikina O.V., Shtenberg V.B., Volvach L.N., Biazitov D.T., 2022b. 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* 13 (5), 0680 (in Russian) [Вольвач А.Е., Коган Л.П., Канониди К.Х., Надежка Л.И., Бубукин И.Т., Боборыкина О.В., Штенберг В.Б., Вольвач Л.Н., Биазитов Д.Т. 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 // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 5. 0680]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0680>.

Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., Nadezhka L.I., Bubukin I.T., Shtenberg V.B., Gordetsov A.S., Krasnikova O.V., Kisilitsyn D.I., 2022c. 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>.

Volvach A.E., Kogan L.P., Volvach L.N., Kanonidi K.H., 2026. Precursors the Earthquake on February 6, 2023 on the Turkey. *Natural Hazards* 122 (2), 68. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07754-7>.

Volvach A.E., Kogan L.P., Volvach L.N., Kanonidi K.H., Bubukin I.T., Shtenberg V.B., 2024. The Group of Statistical Precursors of 7.3 and 6.6 Magnitude Earthquakes in the Region of Indonesia. *Natural Hazards* 120 (6), 5601–5616. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06439-x>.

Volvach A.E., Kurbasova G.S., Volvach L.N., 2025b. Parametric Resonance of Surface Geomagnetic Waves as a Precursor of Local Earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 137, 103802. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103802>.