

DOI: 10.17725/rensit.2022.14.373

Статистические свойства магнитного поля земли перед землетрясением, сопровождаемым цунами

¹Вольвач А.Е., ²Коган Л.П., ^{3,4}Заборонкова Т.М.

¹Крымская астрофизическая обсерватория, <https://crao.ru/>

Научный 298688, Крым, Российская Федерация

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, <https://nngasu.ru/>

Нижний Новгород 603950, Российская Федерация

³Нижегородский государственный политехнический университет им. Р.Е.Алексеева, <https://www.nntu.ru/>

Нижний Новгород 603950, Российская Федерация

⁴Институт прикладной физики РАН, <https://ipfran.ru/>

Нижний Новгород 603950, Российская Федерация

E-mail: volvach@bk.ru, L_kog@list.ru, t.zaboronkova@rambler.ru

Поступила 30.10.2022, рецензирована 07.11.2022, принята 14.11.2022

Аннотация: Предлагается методика предсказания землетрясений, сопровождаемых цунами, основанная на изменении статистических свойств магнитного поля Земли, которые анализируются по измерениям, проведенным за несколько суток до землетрясения в Тихом океане. С помощью статистического функционала, позволяющего исследовать вариации уровня хаоса в изучаемом случайном процессе, выявлено возникновение совокупности структур высокой степени детерминированности, свойства которых могут быть интерпретированы как предвестники землетрясения, сопровождаемого возникновением цунами.

Ключевые слова: землетрясение, цунами, статистический функционал, предвестники землетрясения

УДК 550.343

Благодарности: Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00-385). Авторы выражают благодарность сотруднику ИЗМИРАН Канониди К.Х. за предоставленные данные измерений магнитного поля Земли.

Для цитирования: Вольвач А.Е., Коган Л.П., Заборонкова Т.М. Статистические свойства магнитного поля земли перед землетрясением, сопровождаемым цунами. *РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2022, 14(4):373-380. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.373.

Statistical Properties of the Earth's Magnetic Field Before an Earthquake Accompanied by a Tsunami

Alexander E. Volvach

Crimean Astrophysical Observatory, <https://crao.ru/>

Nauchny 298688, Crimea, Russian Federation

E-mail: volvach@bk.ru

Lev P. Kogan

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, <https://nngasu.ru/>

Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation

E-mail: L_kog@list.ru

Tatiana M. Zaboronkova

R.E.Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, <https://www.nntu.ru/>

Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, <https://ipfran.ru/>

Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation

E-mail: t.zaboronkova@rambler.ru

Received 30 October 2022, peer-reviewed 07 November 2022, accepted 14 November 2022

Abstract: A method for predicting earthquakes accompanied by tsunamis based on changes in the statistical properties of the Earth's magnetic field is proposed. Geomagnetic field is analyzed using the measurements taken a few days before the earthquake in the Pacific Ocean. With the help of a statistical functional, which allows one to study the variations in the level of chaos in the random process, the arising a set of structures with a high degree of determinism is revealed. The properties of these structures can be interpreted as precursors of an earthquake accompanied by a tsunami.

Keywords: earthquake, tsunamis, statistical functionality, precursor of earthquake

UDC 550.343

Acknowledgments: Work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-12-00-385). The authors are grateful to IZMIRAN researcher Kanonidi K.Kh. for the provided data of measurements of the Earth's magnetic field.

For citation: Alexander E. Volvach, Lev P. Kogan, Tatiana M. Zaboronkova. Statistical properties of the earth's magnetic field before an earthquake accompanied by a tsunami. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2022, 14(4):373-380e. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.373.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (374)
 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ (375)
 3. МЕТОДИКА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ (376)
 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ (377)
 5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ (379)
- ЛИТЕРАТУРА (379)**

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] на основании изучения свойств мелкомасштабных флуктуаций плотности вероятности магнитного поля, критической частоты ионосферы и шумов сложных биологических систем в сейсмоактивных регионах была предложена и апробирована методика выявления предвестников приближающихся землетрясений. Предложенный подход позволяет, в частности, определять

предвестники сейсмических событий на значительно меньших интервалах времени (несколько дней вместо нескольких месяцев), чем предсказание на основании теоремы Гутенберга-Рихтера [4–8], а также других статистических подходов [9–12]. В данной статье на основании методики [1–3] проанализированы свойства статистического функционала, описывающего характеристики мелкомасштабных флуктуаций плотности вероятности магнитного поля Земли. Измерения геомагнитного поля проводились с 12 по 16 марта 2022 года на магнитовариационной станции KNY (Каноя), расположенной на юге Японии. Изменение амплитуды флуктуаций плотности вероятности геомагнитного поля в сейсмоактивных регионах за несколько суток перед началом землетрясения, связано с появлением в процессе измерений случайной составляющей, вызванной,

например, разломом литосферных плит на наиболее ослабленных участках земной коры. Отметим, что этот случайный процесс слабо зависит от фонового шума, обусловленного совокупностью явлений, обычно имеющих место в соответствующем регионе мира.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Целью данного исследования является определение статистических свойств магнитного поля Земли, являющихся предвестниками приближающегося землетрясения, сопровождаемого цунами. Для выявления таких предвестников используется статистический функционал, ранее введенный и апробированный в [1]:

$$L(n) = \frac{A}{M} \sum_{n=l-(M-1)}^n |\Theta_l|, \quad (1)$$

$$\Theta_l = \sum_{m=0}^{N-1} P_{m,l} (-1)^m.$$

В формуле (1) возьмем $A = 1000$ и $M = 100 \text{ min}$. Выбранное значение коэффициента A позволяет перейти к удобной для анализа области значений функционала $L(n)$ при указанной ширине M временного интервала усреднения. Коэффициенты $P_{m,l}$ – вероятности попадания значений используемой в задаче вспомогательной функции $F[x]$ в интервал вида

$$F[x(t)]_{\min} + mh \leq F[x(t)] \leq F[x(t)]_{\min} + (m+1)h, \quad 0 \leq m \leq N-1. \quad (2)$$

В отличие от функции распределения измеряемой случайной величины $x = x(t)$, функция $F[x]$ должна иметь плотность вероятности, обладающей интегрируемыми особенностями. С учетом этого требования, в работе для расчетов выбрана функция $F[x] = \sin[x(t)]$. Для указанного вида функции $F[x]$ при ширине интервала дискретизации $h = 0.1$ значение N в (1) равно $N = 2h^{-1} = 20$. Статистика (2) строится по результатам измерений X -, Y - и Z -компонент геомагнитного поля (в нТл). Продолжительность любого отрезка

реализации составляет 60 секунд, за которые проводится 60 измерений соответствующей компоненты магнитного поля. Таким образом, значение n в (1) равно количеству минут от момента начала измерений 00:00 12.03.2022 UTC (Coordinated Universal Time – Всемирное координированное время) до текущего момента времени.

В статье показано, что энтропия геомагнитного поля возрастает при приближении землетрясения. Поясним вышесказанное теоретически.

На **Рис. 1** схематически приведены зависимости плотности вероятности $\rho_1(w)$ и $\rho_2(w)$ для фонового шума $x_1(t)$ и соответственно дополнительного (независимого от фонового шума) случайного процесса $x_2(t)$, а также плотность вероятности $\rho(w)$ суммарного случайного процесса $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$, отвечающая свертке вида

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

В [3] теоретически показано, что сглаживание мелкомасштабных флуктуаций кривой $\rho_1(w)$ имеет место при условии, что стандарт флуктуаций случайной величины x_2 , определяющий ширину распределения $\rho_2(w)$, хотя бы в несколько раз превосходит интервал дискретизации h , который определяет эффективный период указанных флуктуаций (см. Рис. 1).

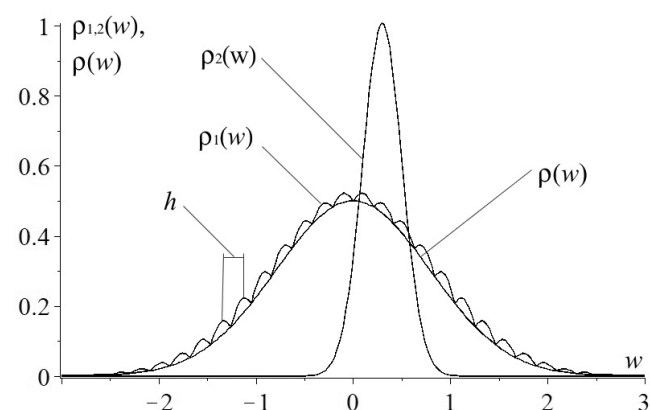


Рис. 1. Схематические вероятностные распределения $\rho_1(w)$, $\rho_2(w)$ и $\rho(w)$.

3. МЕТОДИКА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При анализе статистических свойств магнитного поля используются понятия, ранее введенные в [1]: локальные тренды, каналы, тестирование, скользящие границы. Эти термины проиллюстрированы на примере **Рис. 2**, на котором приведена зависимость функционала $L(n)$, соответствующая измерениям X -компоненты геомагнитного поля.

1. Назовем *локальными трендами* участки зависимости $L(n)$, расположенные между точками экстремумов данной кривой и отвечающие вариациям δL (разность значений функционала $L(n)$ в точках максимума и минимума), удовлетворяющим условию $\delta L \geq 0.2\Delta L_{\max}$.

Здесь ΔL_{\max} – максимальная вариация значений $L(n)$ в пределах всей области от начала отсчета и до момента землетрясения, то есть разность значений наибольшего минимума и наименьшего максимума (соответственно точки A и B на Рис. 2) статистического функционала $L(n)$ на указанном отрезке времени. При этом вводится условие, что геометрическое отклонение ΔS кривой $L(n)$ от отрезка прямой линии, соединяющей граничные точки

данного локального тренда, удовлетворяет условию

$$\Delta S \leq 0.2\Delta l, \quad (3)$$

где Δl – длина этого отрезка. Условие (3) необходимо для обеспечения квазипрямолинейности локального тренда. На Рис. 2 локальным трендом является, например, участок ab кривой $L(n)$. Точки границ локальных трендов будем именовать *направляющими точками*. Полагаем, что каждая такая точка по горизонтали удалена от ближайшей точки кривой $L(n)$ не менее, чем на интервал $\Delta n = 100$ min.

2. *Каналом* называется совокупность двух прямых, каждая из которых проходит точно через две направляющие точки, и при этом угол $\Delta\alpha$ между направлениями этих прямых удовлетворяет неравенству

$$\Delta\alpha \leq 1.4^\circ. \quad (4)$$

В (4) угол $\Delta\alpha$ определяется при помощи скалярного произведения двух векторов, параллельных границам канала (в предположении равенства геометрических размеров единиц декартовых осей). Интервал времени между направляющими точками, через которые проведена граница канала, должен составлять не менее 150 мин. На Рис. 2 отмечены каналы: 1–2, 2–3, 4–5, 4–6,

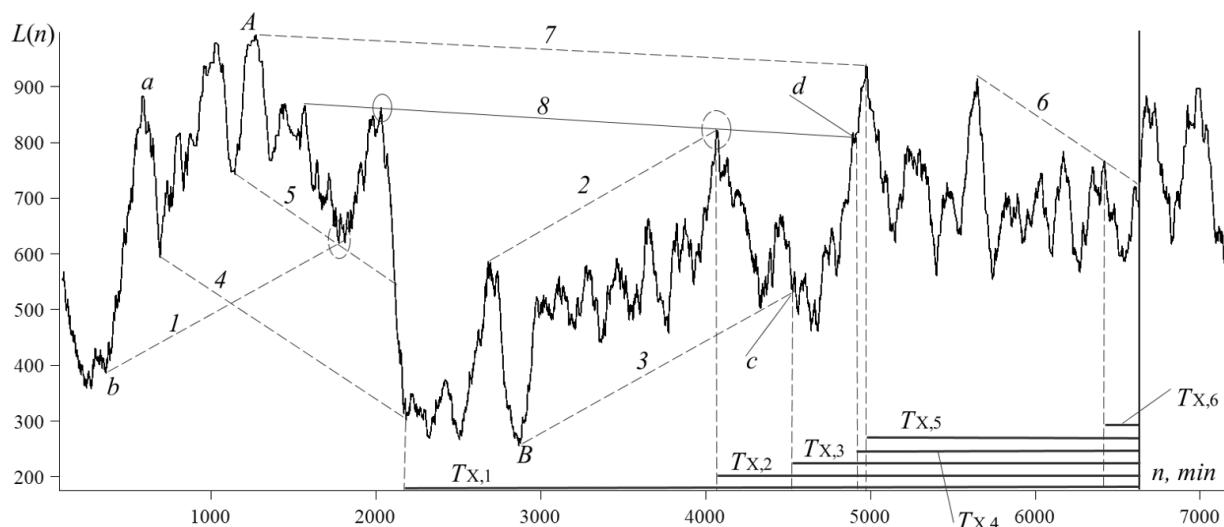


Рис. 2. Зависимость $L(n)$, соответствующая X -компоненте геомагнитного поля.

образуемые двумя наклонными прямыми отрезками, обозначенными на рисунке пунктирной линией. Отметим, что отрезки 7–8 также образуют канал (свойства его нижней границы δ , обсудим ниже).

3. Термин *тестирование* означает либо пересечение в некоторой точке кривой $L(n)$ и соответствующей границы канала, либо прохождение границы канала на расстоянии ΔL_t по вертикали от направляющей точки с координатами $\{n_p, L(n_p)\}$, удовлетворяющем условию $\Delta L_t \leq 0.012 L(n_p)$.

В роли момента регистрации предвестника приближающегося землетрясения будем рассматривать время последнего (перед землетрясением) тестирования границ канала зависимостью $L(n)$ (например, точка c для канала 2–3 на Рис. 2).

4. *Скользкая граница* – прямая линия, проведенная через две направляющие точки и тестируемая кривой $L(n)$ еще как минимум в одной направляющей точке, удовлетворяющей условию (5) (такие точки будем называть дополнительными и выделять на рисунках сплошным эллипсом). Также как и в пункте 3 полагаем, что время регистрации предвестника приближающегося землетрясения отвечает моменту последнего тестирования данной кривой линии скользкой границы (см, например, точку d для скользкой границы δ на Рис. 2). Скользящие границы отмечены на рисунках сплошными наклонными прямыми линиями.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

На Рис. 2–4 приведены зависимости функционала $L(n)$, которые соответствуют измерениям компонент геомагнитного поля на магнитометре KNY, расположенном на юге Японии, в период с 00:00 12.03.2022 по 23:59 16.03.2022. По горизонтальной оси

отложены дискретные значения времени n в минутах $n \geq M = 100 \text{ min}$, отсчитываемые от момента начала измерений. Сплошной вертикальной линией отмечен момент начала землетрясения с магнитудой 7.3, произошедшего 16.03.2022 в 14.37 UTC (координаты эпицентра 37.702°N , 141.587°E) и сопровождавшегося возникновением цунами.

Рис. 2 отвечает зависимости $L(n)$ для измерений X-компоненты геомагнитного поля. Интервалы $T_{X,1} = 4451 \text{ min}$, $T_{X,2} = 2565 \text{ min}$, $T_{X,3} = 2104 \text{ min}$, $T_{X,5} = 1659 \text{ min}$ и $T_{X,6} = 213 \text{ min}$ соответствуют промежуткам времени между началом землетрясения и моментом пятого тестирования для границ каналов 4–5, 1–2, 2–3, 7–8, 4–6, а промежуток времени $T_{X,4} = 1743 \text{ min}$ соответствует точке последнего тестирования для скользкой границы 10. Область вблизи дополнительной точки скользкой границы 10, обозначена сплошным эллипсом.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость $L(n)$ для Y-компоненты геомагнитного поля. В данном случае интервалы $T_{Y,1} = 1896 \text{ min}$, $T_{Y,2} = 682 \text{ min}$, $T_{Y,3} = 662 \text{ min}$, $T_{Y,4} = 662 \text{ min}$, $T_{Y,5} = 548 \text{ min}$ и $T_{Y,6} = 24 \text{ min}$. Здесь $T_{Y,1-5}$ – промежутки времени между началом землетрясения и моментом последнего тестирования для границ каналов 1–2, 4–5, 6–7 и 2–3, а интервал $T_{Y,6}$ соответствует последнему тестированию кривой $L(n)$ скользкой границы 9.

На Рис. 4 зависимость $L(n)$ построена по измерениям Z-компоненты геомагнитного поля. В данном случае скользкие границы отсутствуют, а интервалы $T_{Z,1} = T_{Z,2} = T_{Z,3} = 1820 \text{ min}$ отвечают промежуткам времени между началом землетрясения и моментом последнего тестирования для границ каналов 1–2, 3–4, 5–6 соответственно.

Отметим, что, как следует из анализа Рис. 2–4, перед началом рассматриваемого землетрясения для зависимостей $L(n)$, отвечающих X-, Y- и Z-составляющим

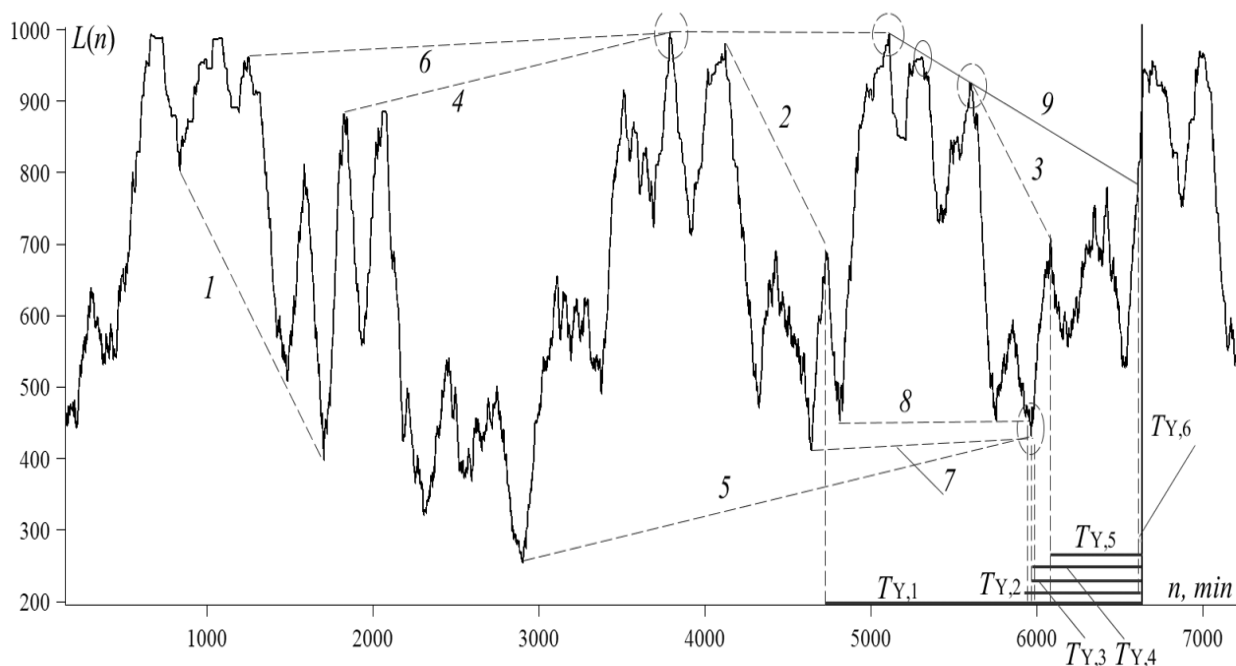


Рис. 3. Зависимость $L(n)$, соответствующая Y -компоненте геомагнитного поля.

геомагнитного поля, имело место возникновение многочисленных линейных структур, подобных тем, что предшествовали сейсмическим событиям, рассмотренным в работах [1–3].

Значения, указанных на рисунках 2-4, интервалов времени от момента регистрации предвестника и до начала землетрясения приведены в Таблице.

Как видно из данных, приведенных в Таблице, почти все зарегистрированные

Таблица

Значения интервалов времени $T_{x,i}$, $T_{y,i}$ и $T_{z,i}$.

i	$T_{x,i}$, min	$T_{y,i}$, min	$T_{z,i}$, min
1	4451	1896	1820
2	2565	682	1820
3	2104	682	1820
4	1743	682	
5	1569	548	
6	213	24	

предвестники относятся к интервалу от десяти часов до двух с половиной суток перед моментом начала сейсмического события.

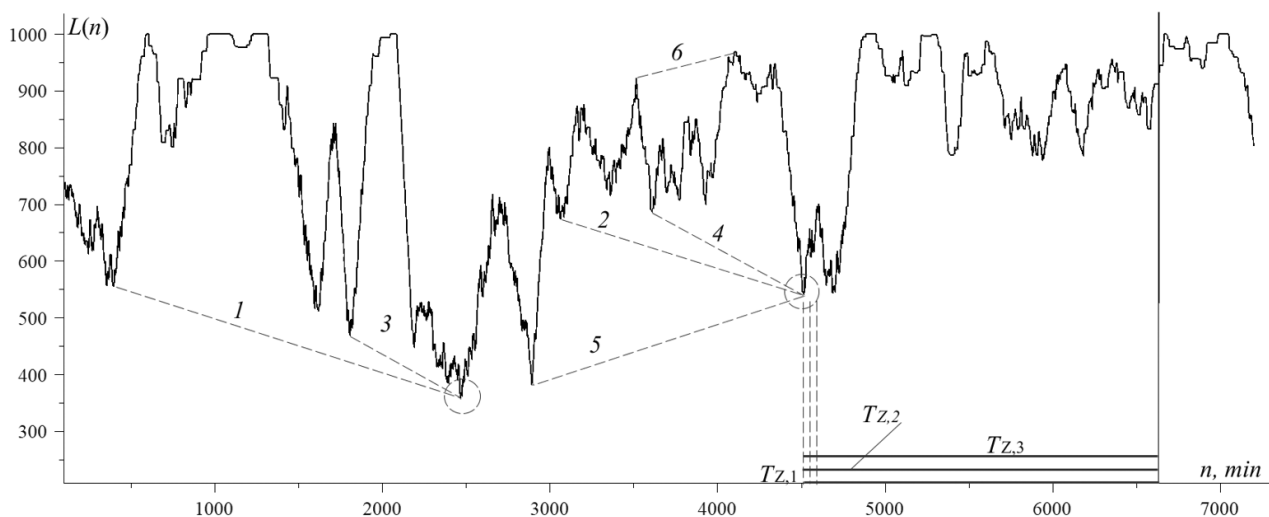


Рис. 4. Зависимость $L(n)$, соответствующая Z -компоненте геомагнитного поля.

Проведенный анализ показал, что количество предвестников на рассматриваемом временном интервале порядка несколько суток до землетрясения увеличивается пропорционально длительности интервала времени, предшествующего сейсмическому событию.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате анализа статистики измерений компонент геомагнитного поля приходим к следующим выводам:

1. Для каждого канала хотя бы одна из его границ проходит через критическую точку, принадлежащую границе другого канала. Отмеченное свойство свидетельствует о взаимном влиянии сейсмических процессов на этапе "итоговой подготовки" приближающегося землетрясения.
2. Сейсмическому событию предшествуют критические точки, связанные с синхронным или очень близким по времени возникновением трех предвестников, определяемых как точки последнего тестирования соответствующих каналов. Это может быть интерпретировано как одновременное возникновение трех или более процессов, связанных с "итоговой подготовкой" приближающегося землетрясения.
3. Во всех представленных случаях линейные структуры функционала $L(n)$ проходят через точку наиболее глубокого его минимума. Этот эффект вполне согласуется с теоретическим предположением, что указанный минимум соответствует моменту наибольшего сжатия литосферных плит. Такое сжатие с высокой вероятностью может приводить к возникновению процессов разрушения наиболее ослабленных блоков земной коры, которые и сопровождаются

формированием скользящих границ и каналов статистического функционала.

4. Как следует из таблицы, семь из 15 зафиксированных предвестников расположены на относительно узком интервале от 30 до 35 часов до землетрясения, и столько же предвестников – на промежутке времени порядка 11 часов перед началом данного события, что является подтверждением взаимосвязи протекающих процессов и достоверности применяемой методики.

Таким образом, приходим к заключению, что совокупность анализируемых свойств статистического функционала $L(n)$ может быть индикатором приближения момента землетрясения, сопровождаемого последующим за ним цунами. При использовании рассматриваемой статистической методики удалось не только зафиксировать совокупность предвестников приближения рассматриваемого сейсмического события, но и выявить моменты времени, при которых с высокой вероятностью достигаются экстремально высокие уровни сейсмического сдавливания литосферных плит в зоне подготовки землетрясения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Volvach AE, Kogan LP, Kanonidi KH, Nadezhka LI, Bubukin IT, Shtenberg VB, Gordetsov AS, Krasnikova OV, Kislitsyn DI. Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2022, 108(1):106200-1–106200-18.
2. Volvach AE, Kogan LP, Kanonidi KH, Bubukin IT, Shtenberg VB, Volvach LN, Biazitov DT. Statistical precursors of a strong earthquake on April 6, 2009 on the Apennine Peninsula. *Heliyon*, 2022, 8(8):e10200-1–e10200-22.

3. Kogan LP. Change in statistical functionals of critical frequency prior to strong earthquakes. *Geomagn. Aeron.*, 2015, 55:507-520.
4. Gutenberg B, Richter CF. Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, 34(4):185-188.
5. Gutenberg B and Richter CF. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. 2nd ed. Princeton, N.J., Princeton University Press, 1954, 255 p.
6. Amitrano D. Variability in the power-law distributions of rupture events, How and why does b-value change. *Eur. Phys. J.*, 2012, 205:199-215.
7. Popandopoulos GA, Lukk AA. The depth variations in the b-value of frequency-magnitude distribution of the earthquakes in the Garm region of Tajikistan. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2014, 50(2):273-288.
8. Popandopoulos GA. Spatiotemporal variations in Gutenberg–Richter b-value depending on the depth and lateral position in the earth's crust of the Garm region, Tajikistan. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2020, 56(3):337-356.
9. Han Q, Wang L, Xu J, Carpinteri A, Lacidogna G. A robust method to estimate the b-value of the magnitude–frequency distribution of earthquakes. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2015, 81(A):103-110.
10. Новопашина АВ, Саньков ВА. Миграции реализованной сейсмической энергии в различных геодинамических условиях. *Геодинамика и Тектонофизика*, 2018, 9(1):139-163.
11. Gkarlaouni C, Lasocki S, Papadimitriou E, Tsaklidis G. Hurst analysis of seismicity in Corinth rift and Mygdonia graben (Greece). *Chaos, Solitons & Fractals*, 2017, 96(C):30-42.
12. Trofimenko SV, Bykov VG, Merkulova TV. Space-time model for migration of weak earthquakes along the northern bound Seismol. *Journal of Seismology*, 2017, 21:277–286.

Вольвач Александр Евгеньевич

д.ф.-м.н., с.н.с.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН

Научный 298688, Крым, Россия

E-mail: volvach@bk.ru

Коган Лев Петрович

к.ф.-м.н., доцент

Нижегородский государственный

архитектурно-строительный университет

65, ул. Ильинская, Н.Новгород 603950, Россия

E-mail: l_kog@list.ru

Заборонкова Татьяна Михайловна

д.ф.-м.н., профессор

Нижегородский государственный

политехнический университет им. Р.Е.Алексеева

24, ул. Минина, Н.Новгород 603950, Россия

Институт прикладной физики РАН

46, ул. Ульянова, Н.Новгород 603950, Россия

E-mail: t.zaboronkova@rambler.ru.