

ISSN 2079-6641 (Print)

ISSN 2079-665X (Online)

ВЕСТНИК КРАУНЦ



<http://krasec.ru>

ФИЗИКО – МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ



КамГУ



Российская Академия Наук

DOI: 10.26117/2079-6641

Vestnik KRAUNTs
Fiziko-matematicheskie nauki

Bulletin KRASEC
Physical and Mathematical Sciences

2024. T. 49. № 4

2024. vol. 49. no. 4

12 +

Содержание

Сообщение редакционной коллегии 7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Паровик Р. И.

Исследование бифуркационных диаграмм дробной динамической системы Селькова 9

Сергиенко Д. Ф., Паровик Р. И.

Об одной системе связанных линейных осцилляторов с дробным трением и непостоянными коэффициентами для описания геоакустической эмиссии 20

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Водинчар Г. М., Казаков Е. А., Феценко Л. К.

Комплекс программ моделирования геодинамо на основе спектральных эредитарных моделей 34

Казаков Е. А.

Численная схема для одной интегро-дифференциальной системы, связанной с задачей космического динамо 54

Марченко Л. С.

Алгоритм выделения следа искусственного сигнала вистлера в спектрограмме с помощью интегрированной среды разработки приложений PyChart 68

Полозов Ю. А., Мандрикова О. В.

Анализ вариаций геомагнитного поля по результатам интерактивной системы «Аврора» 81

Фетисова Н. В., Мандрикова О. В.

Анализ динамики ионосферных параметров в возмущенные периоды по результатам работы системы «Аврора» 94

ФИЗИКА

Гапеев М. И., Солодчук А. А.

Моделирование направления осей главных напряжений горных пород при подготовке землетрясений 108

Гвоздарев А. Ю., Сивоконь В. П., Хомутов С. Ю. <i>Оценка величины геомагнитно-индуцированных токов в Центральном энергорайоне энергосистемы Камчатского края</i>	<i>122</i>
Павлов А. В. <i>Оценка прогностической эффективности ионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ в Камчатском регионе</i>	<i>141</i>

Contents

Message from the Editorial Board	7
--	---

MATHEMATICAL MODELLING

Parovik R. I. <i>Study of bifurcation diagrams of Selkov's fractional dynamic system</i>	9
--	---

Sergienko D. F., Parovik R. I. <i>On a system of coupled linear oscillators with fractional friction and non-constant coefficients for describing geoacoustic emission</i>	20
--	----

INFORMATION AND COMPUTING TECHNOLOGIES

Vodinchar G. M., Kazakov E. A., Feshchenko L. K. <i>Geodynamo simulations software package suite based on spectral hereditary models</i>	34
--	----

Kazakov E. A. <i>Numerical scheme for one integro-differential system related to the problem of space dynamo</i>	54
--	----

Marchenko L. S. <i>Algorithm for extracting an artificial whistler signal in a spectrogram using the pycharm integrated application development environment</i>	68
---	----

Polozov Y. A., Mandrikova O. V. <i>Analysis of geomagnetic field variations based on the results of the «Aurora» interactive system</i>	81
---	----

Fetisova N. V., Mandrikova O. V. <i>Analysis of the ionospheric parameter dynamics during disturbed periods based on Aurora system results</i>	94
--	----

PHYSICS

Gapeev M. I., Solodchuk A. A. <i>Modeling of the directions of rock principle stress axes during earthquake preparation</i>	108
---	-----

Gvozdarev A. Y., Sivokon V. P., Khomutov S. Y. <i>Estimation of the geomagnetically-induced current magnitude in the Central Power District of the Kamchatka power system</i>	122
Pavlov A. V. <i>Estimation of the prognostic efficiency of ionospheric disturbances preceding the occurrence of earthquakes with a magnitude of $M \geq 5.0$ in the Kamchatka region</i>	141

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ И ЧИТАТЕЛИ!

Журнал Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки вошел в перечень рецензируемых научных изданий ВАК (№ 411 список от 31.12.2023), в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, как журнал, входящий в международные реферативные базы данных и системы цитирования (MathSciNet и zbMath) и согласно таблицы ВАК обладает категорией К1.

За последнее время произошло расширение редакционной коллегии журнала, была создан редакционный совет, в который вошли ведущие ученые, в том числе из таких стран как Китай, Индия, Иран, ЮАР, Турция, Италия, Венгрия, Германия, Польша, Узбекистан, Казахстан. Это позволило расширить спектр направлений журнала.

Основные рубрики журнала соответствуют следующим обновленным шифрам научных специальностей:

— Математика

1.1.1. Вещественный, комплексный и функциональный анализ

1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика

— Математическое моделирование

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

— Информационные и вычислительные технологии

1.1.6. Вычислительная математика

2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

— Физика

1.3.3. Теоретическая физика

1.3.6. Оптика

1.3.7. Акустика

1.3.8. Физика конденсированного состояния

1.6.9. Геофизика

1.6.18. Науки об атмосфере и климате

— Приборы и методы измерений

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

2.2.4. Приборы и методы измерений (по видам измерений)

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Журнал также публикует специальные выпуски, посвященные конференциям разного уровня по тематике журнала.

Журнал «Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки» находится в свободном доступе. Тип лицензии СС поддерживаемый журналом: (СС

ВУ 4.0). Полнотекстовые выпуски журнала размещаются на Общероссийском математическом портале Math-Net.Ru.

За 14 лет своего существования, благодаря авторам и читателям, журнал получил хорошее устойчивое развитие, расширилась география участников и редакционной коллегии, сформировалась база рецензирования, повысились индексы цитируемости, журнал вошел в более 30-ти баз цитирования, всем статьям присваивается цифровой индентификатор DOI.

В №3 журнала «Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки» за 2024 г. было опубликовано 8 статей авторов из России и Узбекистана. Среди 15 авторов: 4 — доктора наук, 5 — кандидаты наук, 6 — молодые ученые, аспиранты и преподаватели, научные сотрудники без степени.

Редакционная коллегия заинтересована в дальнейшем сотрудничестве, в формировании широкого высокопрофессионального научного коллектива авторов, публикующихся на его страницах, в создании своей устойчивой читательской аудитории.

Редакционная коллегия



Исследование бифуркационных диаграмм дробной динамической системы Селькова

*Р. И. Паровик**

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7, Россия

Аннотация. В статье исследуются динамические режимы дробной системы Селькова с переменной наследственностью (памятью). Эффект переменной наследственности означает, что наследственность изменяется во времени, т.е. зависимость текущего состояния системы от предыдущих также зависит от времени. Переменная наследственность в дробной системе Селькова с точки зрения математики описывается с помощью производных дробных переменных порядков типа Герасимова-Капуто. Дробная динамическая система Селькова исследуется с помощью численного метода Адамса-Вашфорда-Мултона из семейства предиктор-корректор. С помощью численного алгоритма строятся различные бифуркационные диаграммы — зависимости полученного численного решения от различных значений параметров модельных уравнений. Численный алгоритм Адамса-Вашфорда-Мултона и построение бифуркационных диаграмм были реализованы на языке Python в среде PyChart 2024.1. Исследование бифуркационных диаграмм показало наличие не только регулярных режимов: предельных циклов и затухающих колебаний и хаотических колебаний, но и выявило сингулярность — неограниченный рост решения при изменении значений порядков дробных производных в модельном уравнении. Бифуркационные диаграммы могут содержать участки кривой со всплесками и без. Всплески могут указывать на релаксационные колебания или хаотические режимы, отсутствие всплесков соответствует затухающим колебаниям или аперiodическим режимам.

Ключевые слова: математическое моделирование, дробная динамическая система Селькова, осциллограмма, фазовая траектория, бифуркационные диаграммы, статистические характеристики, дробные производные переменного порядка, зредитарность, Python, PyChart.

Получение: XX.11.2024; Исправление: XX.11.2024; Принятие: XX.11.2024; Публикация онлайн: XX.12.2024

Для цитирования. Паровик Р.И. Исследование бифуркационных диаграмм дробной динамической системы Селькова // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 9-19. EDN: ZNIAZE. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-9-19>.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ № 22-11-00064 по теме "Моделирование динамических процессов в геосферах с учетом наследственности"

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция:  E-mail: parovik@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Паровик Р.И., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)





Study of Bifurcation Diagrams of Selkov's Fractional Dynamic System

*R. I. Parovik**

Institute for Cosmophysical Research and Radio Propagation FEB RAS, 684034, v. Paratunka, Mirnaya st., 7, Russia

Abstract. The article studies the dynamic modes of the fractional Selkov system with variable heredity (memory). The effect of variable heredity means that heredity changes over time, i.e. the dependence of the current state of the system on the previous ones also depends on time. Variable heredity in the fractional Selkov system is described from the mathematical point of view using derivatives of fractional variables of the Gerasimov-Caputo type. The fractional dynamic Selkov system is studied using the Adams-Bashforth-Multon numerical method from the predictor-corrector family. Using the numerical algorithm, various bifurcation diagrams are constructed — dependences of the obtained numerical solution on various values of the parameters of the model equations. The Adams-Bashforth-Multon numerical algorithm and the construction of bifurcation diagrams were implemented in Python in the PyCharm 2024.1 environment. The study of bifurcation diagrams showed the presence of not only regular regimes: limit cycles and damped oscillations and chaotic oscillations, but also revealed a singularity — unlimited growth of the solution when changing the values of the orders of fractional derivatives in the model equation. Bifurcation diagrams may contain curve sections with and without spikes. Spikes may indicate relaxation oscillations or chaotic modes, the absence of spikes corresponds to damped oscillations or aperiodic modes.

Key words: mathematical modeling, fractional dynamic Selkov system, oscillogram, phase trajectory, bifurcation diagrams, statistical characteristics, fractional derivatives of variable order, hereditary, Python, PyCharm

Received: XX.11.2024; Revised: XX.11.2024; Accepted: XX.11.2024; First online: XX.12.2024

For citation. Parovik R. I. Study of bifurcation diagrams of Selkov's fractional dynamic system. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 9-19. EDN: ZNIAZE. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-9-19>.

Funding. The research was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 22-11-00064 on the topic "Modeling of dynamic processes in the geospheres taking into account heredity"

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. The author participated in the writing of the article and is fully responsible for submitting the final version of the article to the press.

*Correspondence:  E-mail: parovik@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Parovik R. I., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Динамические системы играют важную роль в различных областях знаний и зачастую бывает так, что одна и также динамическая система может описывать похожие процессы, но разной природы. Это свойство динамической системы иногда называют универсальностью. Не исключением является и динамическая система Селькова. Она часто встречается в биологии при исследовании гликолитических реакций, которые имеют автоколебательные режимы [1].

Далее в статье [2] было предложено использовать динамическую систему Селькова для описания автоколебательных режимов микросейсм — колебаний земной поверхности малой амплитуды, источником которых являются природные и техногенные процессы.

В работе [3] было проведено обобщение динамической системы на случай учета наследственности. Это свойство динамической системы сохранять память о своей эволюции, т.е. текущее состояние системы зависит от предыдущих ее состояний. С точки зрения математики наследственность можно описать в общем случае с помощью интегро-дифференциальных уравнений вольтерровского типа [4], а при определенных условиях с помощью производных дробных постоянных или переменных порядков, которые изучаются в рамках теории дробного исчисления [5, 6]. Поэтому мы далее динамическую систему Селькова с учетом наследственности будем называть дробной динамической системой Селькова.

Был проведен количественный и качественный анализ динамической системы Селькова с учетом наследственности, основные результаты которого были отражены не только в статье [3], но и в других работах автора [7, 9, 16].

В настоящей работе предлагается дальнейшее исследование дробной динамической системы Селькова, которое связано с построением бифуркационных диаграмм на основе полученного решения в зависимости от различных значений параметров системы.

Постановка задачи и методика ее решения

Рассмотрим следующую задачу:

$$\begin{cases} \partial_{0t}^{\alpha_1(t)} x(t) = -v_1(t)x(t) + w_1(t)y(t) + h_1(t)x^2(t)y(t), x(0) = x_0, \\ \partial_{0t}^{\alpha_2(t)} y(t) = v_2(t) - w_2(t)y(t) - h_2(t)x^2(t)y(t), y(0) = y_0. \end{cases} \quad (1)$$

где $x(t), y(t) \in C^1[0, T]$ — функции решения, $v_1(t) = \theta^{1-\alpha_1(t)}$, $v_2(t) = v_0\theta^{1-\alpha_2(t)}$, $w_1(t) = w_0\theta^{1-\alpha_1(t)}$, $w_2(t) = w_0\theta^{1-\alpha_2(t)}$, $h_1(t) = h_0\theta^{1-\alpha_1(t)}$, $h_2(t) = h_0\theta^{1-\alpha_2(t)}$ — функции из класса $C[0, T]$, θ — параметр имеющий размерность времени, v_0, w_0, h_0 — заданные константы, $t \in [0, T]$ — текущее время процесса, $T > 0$ — время моделирования; x_0, y_0 — положительные константы, отвечающие за начальные условия; операторы дробных производных имеют вид:

$$\partial_{0t}^{\alpha_1(t)} x(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha_1(t))} \int_0^t \frac{\dot{x}(\tau) d\tau}{(t-\tau)^{\alpha_1(t)}}, \quad \partial_{0t}^{\alpha_2(t)} y(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha_2(t))} \int_0^t \frac{\dot{y}(\tau) d\tau}{(t-\tau)^{\alpha_2(t)}},$$

понимются в смысле Герасимова-Капуто [10, 11], порядки которых $0 < \alpha_1(t), \alpha_2(t) < 1$ являются функциями из класса $C[0, T]$.

Замечание 1. Отметим, что информацию о производных дробного переменного порядка можно найти в обзорной статье [12].

В настоящей работе мы будем использовать численный алгоритм, основанный на семействе методов предиктор-корректор (метод Адамса-Башфорта-Мултона) [13–16].

$$\begin{cases} x_{k+1}^p = x_0 + \frac{\tau^{\alpha_{1,k}}}{\Gamma(\alpha_{1,k} + 1)} \sum_{j=0}^k \theta_{j,k+1}^1 (-v_{1,j}x_j + w_{1,j}y_j + h_{1,j}x_j^2y_j), \\ y_{k+1}^p = y_0 + \frac{\tau^{\alpha_{2,k}}}{\Gamma(\alpha_{2,k} + 1)} \sum_{j=0}^k \theta_{j,k+1}^2 (v_{2,j} - w_{2,j}y_j - h_{2,j}x_j^2y_j), \\ \theta_{j,k+1}^i = (k - j + 1)^{\alpha_{i,k}} - (k - j)^{\alpha_{i,k}}, i = 1, 2. \end{cases} \quad (2)$$

Для корректора (формула Адамса-Моултона) получим:

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_0 + K_{1,k} \left(-v_{1,k+1}x_{k+1}^p + w_{1,k+1}y_{k+1}^p + h_{1,k+1}x_{k+1}^{p2}y_{k+1}^p \right) + \\ + K_{1,k} \left(\sum_{j=0}^k \rho_{j,k+1}^1 (-v_{1,j}x_j + w_{1,j}y_j + h_{1,j}x_j^2y_j) \right), \\ y_{k+1} = y_0 + K_{2,k} \left(v_{2,k+1} - w_{2,k+1}y_{k+1}^p - h_{2,k+1}x_{k+1}^{p2}y_{k+1}^p \right) + \\ + K_{2,k} \sum_{j=0}^k \rho_{j,k+1}^2 (v_{2,j} - w_{2,j}y_j - h_{2,j}x_j^2y_j). \end{cases} \quad (3)$$

где $K_{1,k} = \frac{\tau^{\alpha_{1,k}}}{\Gamma(\alpha_{1,k} + 2)}$, $K_{2,k} = \frac{\tau^{\alpha_{2,k}}}{\Gamma(\alpha_{2,k} + 2)}$, а весовые коэффициенты в (3) определяются по формуле:

$$\rho_{j,k+1}^i = \begin{cases} k^{\alpha_{i,k+1}} - (k - \alpha_{i,k})(k + 1)^{\alpha_{i,k}}, j = 0, \\ (k - j + 2)^{\alpha_{i,k+1}} + (k - j)^{\alpha_{i,k+1}} - 2(k - j + 1)^{\alpha_{i,k+1}}, 1 \leq j \leq k, \\ 1, j = k + 1, \\ i = 1, 2. \end{cases}$$

Замечание 2. Исследование свойств метода Адамса-Башфорта-Мултона проводилось в статье автора [16].

Результаты моделирования

Численный алгоритм (2), (3) был реализован на языке программирования Python [17] в среде PyCharm 2024.1 с возможностью визуализации результатов моделирования [18].

Пример 1. На рис.1 приведен график 3D поверхностей $x(\alpha_1, \alpha_2)$ и $y(\alpha_1, \alpha_2)$, где $\alpha_1, \alpha_2 \in [0.1, 1]$, $v = 0.6$, $w = 0.03$, $h = 1.3$, $\theta = 1$, $x_0 = 0.1$, $y_0 = 0.1$, $t \in [0, 100]$, $N = 3000$, α_1, α_2 – константы.

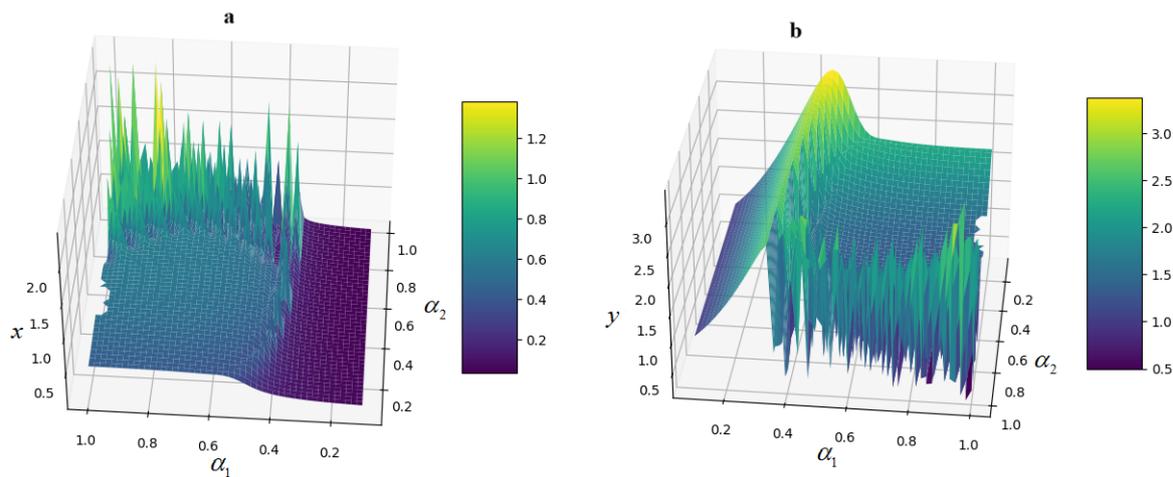


Рис. 1. Поверхности: а) $x = x(\alpha_1, \alpha_2)$; б) $y = y(\alpha_1, \alpha_2)$.
 Figure 1. Surfaces: а) $x = x(\alpha_1, \alpha_2)$; б) $y = y(\alpha_1, \alpha_2)$.

На рис. 1. приведены бифуркационные диаграммы в виде поверхностей искомого решения x и y от значений порядков дробных производных α_1 и α_2 . Отметим, что на поверхностях рис.1а и рис. 1б есть области которые отвечают за регулярные режимы, например, затухающие колебания соответствуют областям без всплесков, в области всплесков могут формироваться предельные циклы, а также предхаотические или хаотические режимы. Кроме того, мы видим область рваные области, что, как мы покажем дальше, связано с сингулярностью.

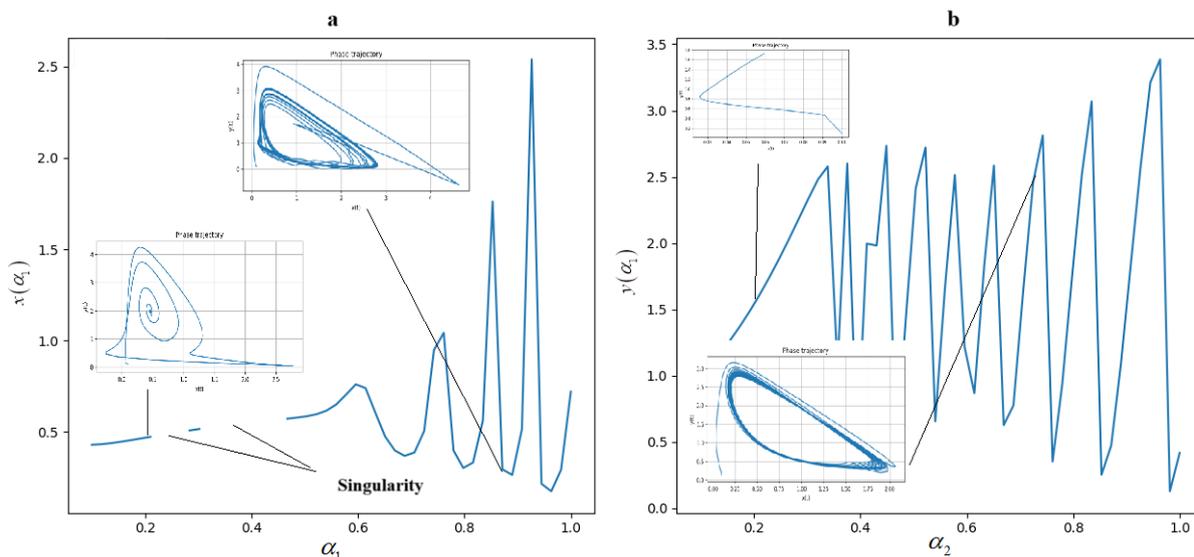


Рис. 2. Расчетные кривые а) $x(\alpha_1), \alpha_2 = 1$; б) $y(\alpha_2), \alpha_1 = 1$.
 Figure 2. Calculated curves а) $x(\alpha_1), \alpha_2 = 1$; б) $y(\alpha_2), \alpha_1 = 1$.

На рис. 2 дается бифуркационная диаграмма — сечение поверхности на рис. 1 при $\alpha_2 = 1$ для решения x (рис.2а) и при $\alpha_1 = 1$ для решения y (рис. 2б). Мы видим на этих бифуркационных диаграммах, например, на рис.2а

три режима, сначала идет затухающий режим вплоть до $\alpha_1 = 0.6$, причем прерывистая линия вначале указывает на сингулярность. Далее идут всплески, которые указывают предельный цикл. Причем на рис.2а всплески с возрастающей амплитудой указывают на то, что орбита предельного цикла увеличивается. Это подтверждается фазовыми траекториями на врезках к рис.2а и рис.2б.

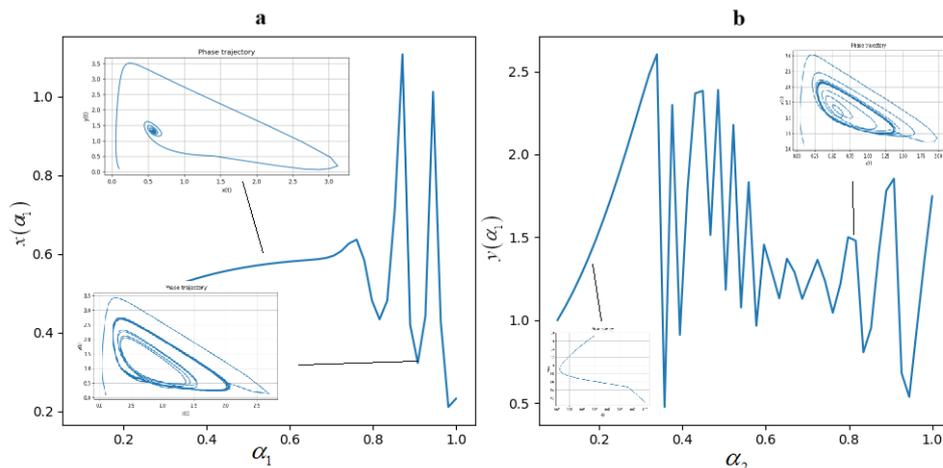


Рис. 3. Расчетные кривые а) $x(\alpha_1)$, $\alpha_2 = 0.8$; б) $y(\alpha_2)$, $\alpha_1 = 0.8$.
Figure 3. Calculated curves а) $x(\alpha_1)$, $\alpha_2 = 0.8$; б) $y(\alpha_2)$, $\alpha_1 = 0.8$.

На рис. 3 приведены бифуркационные диаграммы, построенные при других значениях параметров с врезками фазовых траекторий для различных участков диаграмм. Здесь мы можем отметить, например, на рис. 3а всплески идут с уменьшающейся амплитудой, что указывает на уменьшении орбиты предельного цикла. Здесь сингулярности нет.

На рис. 3б всплески идут сначала с возрастающей амплитудой, потом с убывающей и т.д. Однако если такое чередование будет непоследовательным или иметь хотический характер, то мы будем приходить к хаотическим или предхаотическим режимам.

Отметим, что на рис. 3б мы также видим аperiодический режим – режим при котором отсутствуют колебания, которому на бифуркационной диаграмме соответствует кривая без всплесков.

Рассмотрим теперь другой пример дробной динамической системы Селькова, когда $\alpha_1(t)$ и $\alpha_2(t)$ являются функциями от t .

Пример 2. Значения параметров выберем следующими: $N = 10000$, $t \in [0, 1000]$, остальные параметры возьмем из Примера 1. Порядки дробных производных изменяются во времени t по следующим законам:

$$\alpha_1(t) = 0.8 - \frac{1}{100} \cos(0.1\pi t), \quad \alpha_2(t) = 0.8 - \frac{9}{1000} \sin(0.1\pi t). \quad (4)$$

Построим бифуркационные диаграммы в виде поверхностей для решений $x(\alpha_1, \alpha_2)$ и $y(\alpha_1, \alpha_2)$ (Рис. 4).

Мы видим, что на рис. 4 поверхности представляют вполне регулярную фигуру цилиндрической формы.

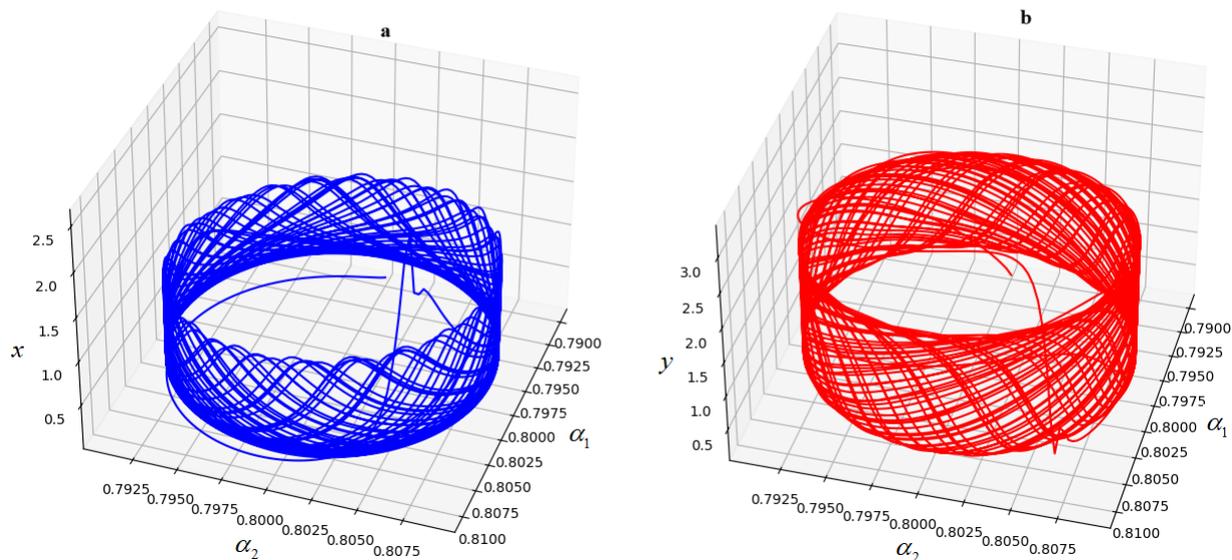


Рис. 4. 3D поверхности а) $x(\alpha_1, \alpha_2)$; б) $y(\alpha_1, \alpha_2)$.
 Figure 4. 3D surfaces а) $x(\alpha_1, \alpha_2)$; б) $y(\alpha_1, \alpha_2)$.

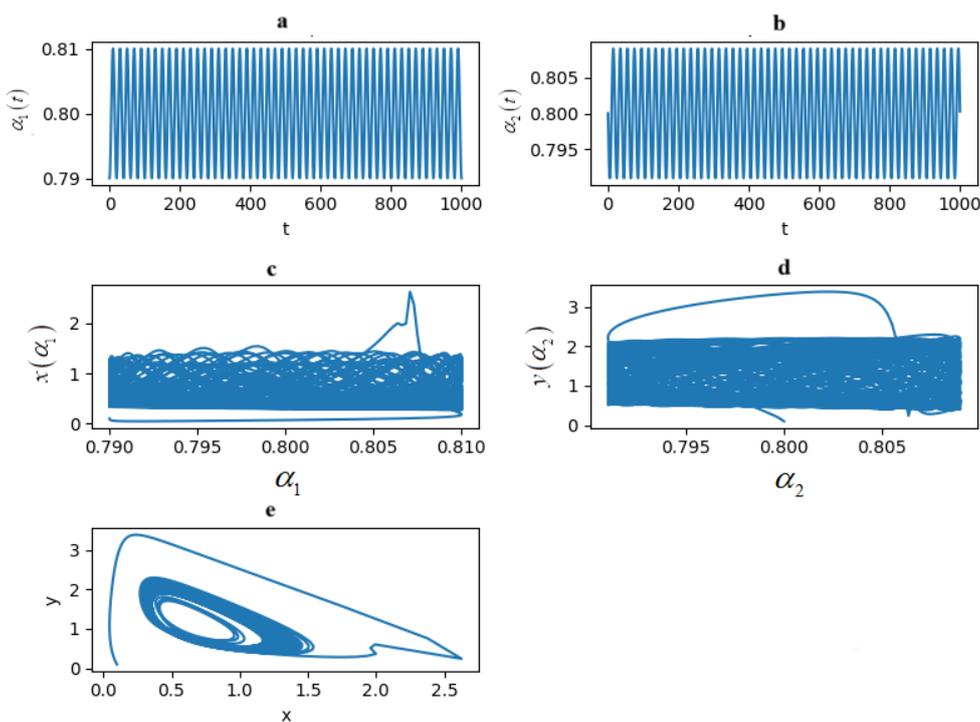


Рис. 5. Расчетные кривые а) $\alpha_1(t)$; б) $\alpha_2(t)$; в) $x(\alpha_1)$; д) $y(\alpha_2)$; е) $y = y(x)$.
 Figure 5. Calculated curves а) $\alpha_1(t)$; б) $\alpha_2(t)$; в) $x(\alpha_1)$; д) $y(\alpha_2)$; е) $y = y(x)$.

На рис. 5 приведены расчетные кривые $\alpha_1(t)$ и $\alpha_2(t)$ по формулам (4) (рис.5а,б). Сечения поверхности плоскостями $x(\alpha_1)$ и $y(\alpha_2)$ (рис. 5,с,д), также фазовая траектория (рис. 5е).

В заключение приведем бифуркационные диаграммы других ключевых параметров дробной динамической системы Селькова (рис.6).

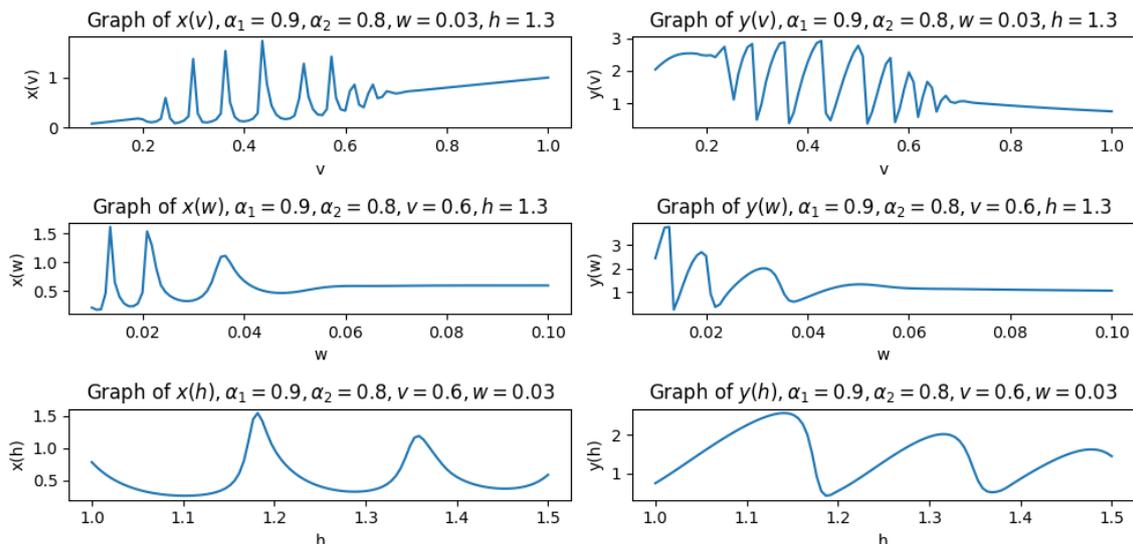


Рис. 6. Бифуркационные диаграммы зависимостей решения x и y от различных значений параметров модели.
 Figure 6. Bifurcation diagrams of the dependences of the solution x and y on various values of the model parameters.

Здесь мы также видим на бифуркационных диаграммах (рис. 6), что есть "спокойные" участки, а есть участки со всплесками. Все это указывает на наличие различных динамических режимов.

Заключение

Исследованы различные бифуркационные диаграммы для дробной динамической системы Селькова в случае, когда $\theta = 1$. Алгоритм построения бифуркационных диаграмм основан на численном алгоритме Адамса-Башфорта-Мултона (2), (3). Фазовые траектории и осциллограммы были получены с помощью программного комплекса ABMSelkovFracSim [16] написанного на языке программирования Python на в среде PyCharm 2014.1.

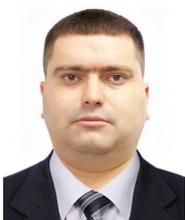
Показано, что расчетные кривые зависимостей решения дробной динамической системы Селькова от значений порядков дробных производных характеризуют изменение динамических режимов, т.е. являются бифуркационными диаграммами. Показано, наличие регулярных и хаотических режимов, а также наличие сингулярности.

Дальнейшее изучение бифуркационных диаграмм связано с построением карт динамических режимов [19, 20], а также в случае когда $\theta \neq 1$. Для этих целей необходимо привлекать более мощные вычислительные ресурсы, например, вычислительные серверы с возможностью использования процессоров CPU или GPU.

Список литературы

1. Selkov E. E. Self-oscillations in glycolysis. I. A simple kinetic model, *Eur. J. Biochem.*, 1968. no. 4, pp. 79–86.
2. Маковецкий В. И., Дудченко И. П., Закупин А. С. Автоколебательная модель источников микросейсм, *Геосистемы переходных зон*, 2017. №4(1), С. 37–46.
3. Parovik R.I. Studies of the Fractional Selkov Dynamical System for Describing the Self-Oscillatory Regime of Microseisms. *Mathematics*. 2022. vol. 10. no. 22. 4208. DOI: 10.3390/math10224208.
4. Volterra V. *Functional theory, integral and integro-differential equations*. New York: Dover Publications, 2005. 288 pp.
5. Нахушев А.М. *Дробное исчисление и его применение*. М.: Физматлит, 2003. 272 с.
6. Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J. *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*. Amsterdam: Elsevier, 2006. 523 pp.
7. Паровик Р.И. Исследование дробной динамической системы Селькова, *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2022. Т. 41, №4, С. 146–166 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-146-166.
8. Parovik R. I. Selkov Dynamic System with Variable Heredity for Describing Microseismic Regimes / *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors*, Proceedings of the XIII International Conference, Paratunka., Cham, Switzerland:, Springer Nature Switzerland AG, 2023, pp. 166-178 DOI:10.1007/978-3-031-50248-4_18.
9. Паровик Р.И. Качественный анализ дробной динамической системы Селькова с переменной памятью с помощью модифицированного алгоритма Тест 0-1, *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2023. Т. 45, №4, С. 9-23 DOI: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-9-23..
10. Герасимов А. Н. Обобщение законов линейного деформирования и их применение к задачам внутреннего трения, *АН ССР. Прикладная математика и механика*, 1948. Т. 44, №6, С. 62-78.
11. Caputo M. Linear models of dissipation whose Q is almost frequency independent - II, *Geophysical Journal International*, 1967. vol. 13, pp. 529-539.
12. Patnaik S., Hollkamp J. P., Semperlotti F. Applications of variable-order fractional operators: A review, *Proc. R. Soc. A R. Soc. Publ.*, 2020. №476, 20190498 DOI: 10.1098/rspa.2019.0498.
13. Diethelm K., Ford N. J., Freed A. D. A predictor-corrector approach for the numerical solution of fractional differential equations, *Nonlinear Dynamics*, 2002. vol. 29, no. 1-4, pp. 3-22 DOI: 10.1023/A:1016592219341.
14. Yang C., Liu F. A computationally effective predictor-corrector method for simulating fractional order dynamical control system, *ANZIAM Journal*, 2005. vol. 47, pp. 168-184 DOI: 10.21914/anziamj.v47i0.1037.
15. Garrappa R. Numerical solution of fractional differential equations: A survey and a software tutorial, *Mathematics*, 2018. vol. 6, no. 2, 016 DOI: 10.3390/math6020016.
16. Паровик Р.И. *ABMSelkovFracSim – программный комплекс для качественного и количественного анализа дробной динамической системы Селькова.*, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681529 РФ., 2024.
17. Shaw Z. A. *Learn Python the Hard Way*: Addison-Wesley Professional, 2024. 306 pp.
18. Van Horn B. M. II, Nguyen Q. *Hands-On Application Development with PyCharm: Build Applications like a Pro with the Ultimate Python Development Tool*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd., 2023.
19. Bao B. et al. Memristor-induced mode transitions and extreme multistability in a map-based neuron model, *Nonlinear Dynamics*, 2023. vol. 111, no. 4, pp. 3765-3779 DOI: 10.1007/s11071-022-07981-8.
20. Colbrook M. J. et al. Beyond expectations: residual dynamic mode decomposition and variance for stochastic dynamical systems, *Nonlinear Dynamics*, 2024. vol. 112, no. 3, pp. 2037-2061 DOI: 10.1007/s11071-023-09135-w.

Информация об авторе



Паровик Роман Иванович  – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования физических процессов института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0002-1576-1860.

References

- [1] Selkov E. E. Self-oscillations in glycolysis. I. A simple kinetic model. *Eur. J. Biochem.* 1968. no. 4. pp. 79–86.
- [2] Makovetsky V.I., Dudchenko I.P., Zakupin A.S. Auto oscillation model of microseism's sources. *Geosist. Perekh. Zon.* 2017. no. 4. pp. 37-46.(In Russian).
- [3] Parovik R.I. Studies of the Fractional Selkov Dynamical System for Describing the Self-Oscillatory Regime of Microseisms. *Mathematics.* 2022. vol. 10. no. 22. 4208. DOI: 10.3390/math10224208.
- [4] Volterra V. *Functional theory, integral and integro-differential equations.* New York. Dover Publications, 2005. 288 p.
- [5] Nakhshev A. M. *Drobnoye ischisleniye i yego primeneniye [Fractional calculus and its applications].* Moscow. Fizmatlit. 2003. 272 p.(In Russian).
- [6] Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J. *Theory and Applications of Fractional Differential Equations.* Amsterdam. Elsevier. 2006. 523 p.
- [7] Parovik R. I. Investigation of the Selkov fractional dynamical systems. *Vestnik. KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2022. vol. 41. no. 4. pp. 146-166. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-146-166 (In Russian).
- [8] Parovik R. I. Selkov Dynamic System with Variable Heredity for Describing Microseismic Regimes // *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors: Proceedings of the XIII International Conference, Paratunka, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2023.* P. 166-178. DOI 10.1007/978-3-031-50248-4_18.
- [9] Parovik R. I. Qualitative analysis of Selkov's fractional dynamical system with variable memory using a modified Test 0-1 algorithm. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2023, vol. 45. no. 4, pp. 9-23. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-9-23 (In Russian).
- [10] Gerasimov A. N. Generalization of the laws of linear deformation and their application to problems of internal friction. *Academy of Sciences of the SSR. Applied Mathematics and Mechanics, 1948.* Vol. 44, No. 6, pp. 62-78. (In Russian.).
- [11] Caputo M. Linear models of dissipation whose Q is almost frequency independent - II. *Geophysical Journal International, 1967.* vol. 13, pp. 529-539.
- [12] Patnaik S., Hollkamp J.P., Semperlotti F. Applications of variable-order fractional operators: A review. *Proc. R. Soc. A R. Soc. Publ.* 2020. vol. 476. 20190498. DOI: 10.1098/rspa.2019.0498.
- [13] Diethelm K., Ford N. J., Freed A. D. A predictor-corrector approach for the numerical solution of fractional differential equations. *Nonlinear Dynamics.* 2002. vol. 29. no.1-4. pp. 3-22. DOI: 10.1023/A:1016592219341.
- [14] Yang C., Liu F. A computationally effective predictor-corrector method for simulating fractional order dynamical control system. *ANZIAM Journal.* 2005. vol. 47. pp. 168-184. DOI: 10.21914/anziamj.v47i0.1037.
- [15] Garrappa R. Numerical solution of fractional differential equations: A survey and a software tutorial. *Mathematics.* 2018. vol. 6. no. 2. 016. DOI: 10.3390/math6020016.
- [16] Parovik R.I. ABMSelkovFracSim – software package for qualitative and quantitative analysis of the fractional dynamic system of Selkov. Certificate of state registration of the computer program No. 2024681529 RF. 2024 (in Russian).
- [17] Shaw Z. A. *Learn Python the Hard Way.* Addison-Wesley Professional. 2024. 306 p.

- [18] Van Horn, B. M., II; Nguyen, Q. Hands-On Application Development with PyCharm: Build Applications like a Pro with the Ultimate Python Development Tool; Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2023.
- [19] Bao B. et al. Memristor-induced mode transitions and extreme multistability in a map-based neuron model. *Nonlinear Dynamics*. 2023. vol. 111. issue. 4. pp. 3765-3779. DOI: 10.1007/s11071-022-07981-8.
- [20] Colbrook M. J. et al. Beyond expectations: residual dynamic mode decomposition and variance for stochastic dynamical systems. *Nonlinear Dynamics*. 2024. vol. 112. no. 3. pp. 2037-2061. DOI: 10.1007/s11071-023-09135-w.

Information about the author



Parovik Roman Ivanovich ✉ – D. Sci. (Phys. & Math.), Associate Professor, Leading researcher laboratory of modeling physical processes Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-1576-1860.

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-20-33>



Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 517.911

Об одной системе связанных линейных осцилляторов с дробным трением и непостоянными коэффициентами для описания геоакустической эмиссии

Д. Ф. Сергиенко^{*1,2}, Р. И. Паровик²

¹ Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, д.4, Россия

² Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7, Россия

Аннотация. В работе предложено обобщение ранее полученной математической модели геоакустической эмиссии, согласно которому в модели учитываются эффекты наследственности в диссипативных членах. Модель представляет систему из двух связанных линейных осцилляторов с непостоянными коэффициентами и с производными дробных порядков Герасимова-Капуто, которые описывают вязкое трение (дробное трение). Математическая модель исследуется численно с помощью нелокальной явной конечно-разностной схемы первого порядка точности, которая была реализована в среде компьютерной символической математики Maple 2022. В этой компьютерной среде была произведена визуализация результатов моделирования: построены осциллограммы и фазовые траектории при различных значениях параметров модели. Дана интерпретация результатов моделирования. Показано, что дробное трение может влиять на процесс взаимодействия источников геоакустической эмиссии.

Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, дробная производная Герасимова-Капуто, модель, осциллограммы, фазовая траектория, Maple 2022

Получение: XX.11.2024; Исправление: XX.11.2024; Принятие: XX.11.2024; Публикация онлайн: XX.11.2024

Для цитирования. Сергиенко Д. Ф., Паровик Р. И. Об одной системе связанных линейных осцилляторов с дробным трением и непостоянными коэффициентами для описания геоакустической эмиссии // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 20-33. EDN: MKTALS. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-20-33>.

Финансирование. Здесь указывается финансовая поддержка

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

***Корреспонденция:** ✉ E-mail: darya@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Сергиенко Д. Ф., Паровик Р. И., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-20-33>

Research Article

Full text in Russian

MSC 34A30



On a System of Coupled Linear Oscillators with Fractional Friction and Non-Constant Coefficients for Describing Geoacoustic Emission

D. F. Sergienko^{1,2}, *R. I. Parovik*²

¹ Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya str., 4, Russia

² Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 684034, Paratunka village, Mirnaya str., 7, Russia

Abstract. The paper proposes a generalization of the previously obtained mathematical model of geoacoustic emission, according to which the model takes into account the effects of heredity in dissipative terms. The model is a system of two coupled linear oscillators with non-constant coefficients and with fractional derivatives of Gerasimov-Caputo orders, which describe viscous friction (fractional friction). The mathematical model is studied numerically using a non-local explicit finite-difference scheme of the first order of accuracy, which was implemented in the Maple 2022 computer symbolic mathematics environment. In this computer environment, the modeling results were visualized: oscillograms and phase trajectories were constructed for different values of the model parameters. The interpretation of the modeling results is given. It is shown that fractional friction can affect the process of interaction of geoacoustic emission sources.

Key words: geoacoustic emission, Gerasimov-Caputo fractional derivative, model, oscillograms, phase trajectory, Maple 2022.

Received: XX.11.2024; Revised: DD.11.2024; Accepted: XX.11.2024; First online: XX.11.2024

For citation. Sergienko D. F., Parovik R. I. On a system of coupled linear oscillators with fractional friction and non-constant coefficients for describing geoacoustic emission. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 20-33. EDN: MKTALS. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-20-33>.

Funding. Financial support is indicated here

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: darya@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Sergienko D. F., Parovik R. I., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Высокочастотная геоакустическая эмиссия (ГЭ) представляет собой важный и актуальный объект исследования в области геофизики и геоэкологии. Этот феномен включает в себя акустические волны, возникающие в результате различных геологических процессов, таких как деформация горных пород, землетрясения, обвалы, а также антропогенные воздействия, включая строительство и добычу полезных ископаемых. Высокочастотные сигналы, часто превышающие 100 кГц, предоставляют ценную информацию о микро- и макроструктурах земной коры, а также о динамике процессов, происходящих в подземной среде [1–7].

Акустические волны, генерируемые в результате геологических процессов, могут служить индикаторами изменений в состоянии горных пород и предсказывать потенциальные риски, связанные с геодинамическими явлениями. Например, анализ ГЭ позволяет выявлять зоны повышенной активности, что может быть критически важным для предотвращения катастроф, связанных с обвалами или землетрясениями [1, 3, 6, 7]. В этом контексте высокочастотная ГЭ становится не только объектом научного интереса, но и инструментом для обеспечения безопасности и устойчивости инфраструктуры.

Современные технологии регистрации и обработки сигналов, такие как массивы микрофонов и цифровые системы обработки данных, значительно расширяют возможности исследования высокочастотной ГЭ [2, 4–6]. Эти технологии позволяют не только фиксировать сигналы с высокой временной и пространственной разрешающей способностью, но и проводить их анализ с использованием методов машинного обучения и статистической обработки данных. Это создает новые перспективы для понимания сложных геодинамических процессов и их взаимосвязей.

Другой подход в исследовании высокочастотной ГЭ связан с математическим моделированием [1]. Этот подход является актуальным так как математических моделей высокочастотной ГЭ очень мало представлено в научной литературе. Преимущество такого подхода заключается в том, что можно с точки зрения математики описать динамический процесс высокочастотной ГЭ, получить его некоторые закономерности, которые потом можно использовать в решении прикладных задач.

В настоящей работе с помощью инструментов математического моделирования была предложена математическая модель высокочастотной ГЭ как система двух линейных связанных осцилляторов с непостоянными коэффициентами и эффектами наследственности в диссипативных членах по аналогии с со статьей [8]. Эффекты наследственности [9] указывают на то, что текущее состояние динамической системы зависит от предыдущих ее состояний, а их математическое описание дается в терминах дробных производных, которые изучаются в рамках теории дробного исчисления [10, 11]. Предложенная математическая модель обобщает ранее известную модель из работ авторов [12, 13], а настоящая статья является продолжением этих работ.

Постановка задачи и методика решения

Рассмотрим следующую динамическую систему:

$$\begin{cases} \ddot{g}_1(t) = \left(\frac{a_1}{t} - \frac{a_1}{b_1}\right) \partial_{0t}^{\beta_1} g_1(t) - \left(\frac{a_1}{t^2} + c_1^2\right) g_1(t) + \\ \quad + \left(\frac{a_1}{t} - \frac{a_1}{b_1}\right) A_1 c_1 t^{a_1} \exp\left(-\frac{a_1}{b_1} t\right) \cos(c_1 t + \phi_{0,1}) + k g_2(t), \\ \ddot{g}_2(t) = \left(\frac{a_2}{t} - \frac{a_2}{b_2}\right) \partial_{0t}^{\beta_2} g_2(t) - \left(\frac{a_2}{t^2} + c_2^2\right) g_2(t) + \\ \quad + \left(\frac{a_2}{t} - \frac{a_2}{b_2}\right) A_2 c_2 t^{a_2} \exp\left(-\frac{a_2}{b_2} t\right) \cos(c_2 t + \phi_{0,2}) + k g_1(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $g_1(t), g_2(t) \in C^2[t_0, T]$ - функции решения, k - коэффициент линейной связи заданная константа, T - время моделирования процесса, $t_0 \neq 0$, $a_i, b_i, c_i, A_i, \phi_{0,i}$, $i = 1, 2$ - заданные константы. Для системы (1) начальные условия можно задать в виде:

$$\begin{cases} g_1(t_0) = A_1 t_0^{a_1} \exp\left(-\frac{a_1}{b_1} t_0\right) \sin(c_1 t_0 + \phi_{0,1}), \\ \dot{g}_1(t_0) = \left(\frac{a_1}{t_0} - \frac{a_1}{b_1}\right) g_1(t_0) + A_1 c_1 t_0^{a_1} \exp\left(-\frac{a_1}{b_1} t_0\right) \cos(c_1 t_0 + \phi_{0,1}), \\ g_2(t_0) = A_2 t_0^{a_2} \exp\left(-\frac{a_2}{b_2} t_0\right) \sin(c_2 t_0 + \phi_{0,2}), \\ \dot{g}_2(t_0) = \left(\frac{a_2}{t_0} - \frac{a_2}{b_2}\right) g_2(t_0) + A_2 c_2 t_0^{a_2} \exp\left(-\frac{a_2}{b_2} t_0\right) \cos(c_2 t_0 + \phi_{0,2}), \end{cases} \quad (2)$$

Дробные производные в правых частях динамической системы (1) понимаются в смысле Герасимова-Капуто [14, 15]:

$$\begin{aligned} \partial_{0t}^{\beta_1} g_1(t) &= \frac{1}{\Gamma(1 - \beta_1)} \int_0^t \frac{g_1(\tau) d\tau}{(t - \tau)^{\beta_1}}, \\ \partial_{0t}^{\beta_2} g_2(t) &= \frac{1}{\Gamma(1 - \beta_2)} \int_0^t \frac{g_2(\tau) d\tau}{(t - \tau)^{\beta_2}}, \quad a < \beta_1, \beta_2 < 1, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Gamma(\cdot)$ — гамма-функция Эйлера.

Замечание 1. Задача (1), (2) является задачей Коши для системы связанных линейных осцилляторов с дробным трением и непостоянными коэффициентами. В случае, когда $\beta_1 = \beta_2 = 1$, то мы получаем задачу Коши, которая была исследована в работах [12, 13].

Замечание 2. Необходимо отметить, что в статье [16] была предложена система связанных линейных осцилляторов с непостоянными коэффициентами для описания высокочастотной геоакустической эмиссии с дробной инерцией. Однако так как система является линейной и не описывает автоколебания, то дробная инерция приводит к быстро затухающим осцилляциям.

Замечание 3. Заметим, что непостоянные коэффициенты в системе (1) со временем убывают до некоторых постоянных значений. Это свойство системы (1) было использовано авторами статьи [12] для качественного анализа системы (1)

при $\beta_1 = \beta_2 = 1$. В том числе и вопросы существования и единственности решения. В настоящей работы мы не будем исследовать этот вопрос, его можно исследовать по аналогии с методикой работы [17].

Несмотря на то, что система (1) является линейной, но за счет наличия непостоянных коэффициентов, решение в аналитическом виде получить сложно. Поэтому мы применим численные методы для решения задачи (1), (2).

Построим нелокальную явную конечно-разностную схему. Для этой цели введем равномерную сетку с шагом $\tau = T/N$, где N — количество узлов сетки. Пусть функции $g_1(t)$ и $g_2(t)$ обладают необходимой гладкостью, тогда вводим сеточные функции $g_1(t_j), g_2(t_j)$, $j = 0, \dots, N-1, t_j = j\tau$. Аппроксимации целочисленных производных в правой части системы (1) и дробных операторов (3) имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{g}_1(t) &\approx \frac{g_{1,j+1} - 2g_{1,j} + g_{1,j-1}}{\tau^2}, \quad \ddot{g}_2(t) \approx \frac{g_{2,j+1} - 2g_{2,j} + g_{2,j-1}}{\tau^2} \\ \partial_{0t}^{\beta_1} g_1(t) &\approx \frac{\tau^{-\beta_1}}{\Gamma(2-\beta_1)} \sum_{i=0}^{j-1} w_i^{\beta_1} (g_{1,j-i+1} - g_{1,j-i}), \\ \partial_{0t}^{\beta_2} g_2(t) &\approx \frac{\tau^{-\beta_2}}{\Gamma(2-\beta_2)} \sum_{i=0}^{j-1} w_i^{\beta_2} (g_{2,j-i+1} - g_{2,j-i}). \end{aligned} \quad (4)$$

где весовые коэффициенты имеют вид:

$$w_i^{\beta_1} = (i+1)^{1-\beta_1} - i^{1-\beta_1}, \quad w_i^{\beta_2} = (i+1)^{1-\beta_2} - i^{1-\beta_2}.$$

Подставляя аппроксимации дифференциальных операторов (4) в (1) с учетом сеточных функций и после некоторых преобразований мы приходим к следующей дискретной системе:

$$\begin{cases} g_{1,j+1} = \frac{1}{1-M_{1,j}} \left((2-M_{1,j}-P_{1,j})g_{1,j} - g_{1,j+1} + F_{1,j} + Kg_{2,j} + M_{1,j} \sum_{i=1}^{j-1} w_i^{\beta_1} (g_{1,j-i+1} - g_{1,j-i}) \right), \\ g_{2,j+1} = \frac{1}{1-M_{2,j}} \left((2-M_{2,j}-P_{2,j})g_{2,j} - g_{2,j+1} + F_{2,j} + Kg_{1,j} + M_{2,j} \sum_{i=1}^{j-1} w_i^{\beta_2} (g_{2,j-i+1} - g_{2,j-i}) \right), \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_{1,j} &= \left(\frac{a_1}{j\tau} - \frac{a_1}{b_1} \right) \frac{\tau^{2-\beta_1}}{\Gamma(2-\beta_1)}, \quad M_{2,j} = \left(\frac{a_2}{j\tau} - \frac{a_2}{b_2} \right) \frac{\tau^{2-\beta_2}}{\Gamma(2-\beta_2)}, \\ P_{1,j} &= \tau^2 \left(\frac{a_1}{(j\tau)^2} + c_1^2 \right), \quad P_{2,j} = \tau^2 \left(\frac{a_2}{(j\tau)^2} + c_2^2 \right), \quad K = \tau^2 k, \\ F_{1,j} &= \tau^2 \left(\frac{a_1}{j\tau} - \frac{a_1}{b_1} \right) A_1 c_1 (j\tau)^{a_1} \exp\left(-\frac{a_1}{b_1} j\tau\right) \cos(c_1 j\tau + \phi_{0,q}), \\ F_{2,j} &= \tau^2 \left(\frac{a_2}{j\tau} - \frac{a_2}{b_2} \right) A_2 c_2 (j\tau)^{a_2} \exp\left(-\frac{a_2}{b_2} j\tau\right) \cos(c_2 j\tau + \phi_{0,q}). \end{aligned}$$

Начальные условия (2) для дискретной системы (5) запишем в виде:

$$\begin{aligned} g_{1,1} &= g_{1,0} + \tau\phi_1, \quad g_{2,1} = g_{2,0} + \tau\phi_2, \\ g_{1,0} &= A_1 t_0^{a_1} \exp\left(-\frac{a_1}{b_1} t_0\right) \sin(c_1 t_0 + \phi_{1,0}), \quad g_{2,0} = A_2 t_0^{a_2} \exp\left(-\frac{a_2}{b_2} t_0\right) \sin(c_2 t_0 + \phi_{2,0}), \\ \phi_1 &= \left(\frac{a_1}{t_0} - \frac{a_1}{b_1} \right) g_{1,0} + A_1 c_1 t_0^{a_1} \exp\left(-\frac{a_1}{b_1} t_0\right) \cos(c_1 t_0 + \phi_{0,1}), \\ \phi_2 &= \left(\frac{a_2}{t_0} - \frac{a_2}{b_2} \right) g_{2,0} + A_2 c_2 t_0^{a_2} \exp\left(-\frac{a_2}{b_2} t_0\right) \cos(c_2 t_0 + \phi_{0,2}). \end{aligned} \quad (6)$$

Замечание 4. Дискретная задача (5) и (6) является нелокальной явной конечно-разностной схемой. Ее нелокальность определяется наличием сумм в правых частях системы (5), в которых присутствуют компоненты решения на предыдущих шагах.

Следуя методике статьи [18], можно показать, что схема (5), (6) имеет первый порядок точности. Несмотря на то, что схема (5), (6) является условно устойчивой, мы всегда можем контролировать шаг сетки, путем увеличения ее узлов.

Результаты моделирования

С помощью нелокальной явной конечно-разностной схемы (5,6) были произведены расчеты осциллограмм и фазовых траекторий и их визуализация, которые мы осуществим в компьютерной среде символьной математики Maple 2022 [19].

В таблице приведены значения некоторых параметров модели (1), которые мы будем использовать в дальнейшем в моделировании [12].

Таблица

Параметры задачи [Task parameters]

Параметры	Значения
a_1	1.3785
b_1	0.004
c_1	31416
a_2	3.1831
b_1	0.006
c_1	31416
A_1	0.5
A_2	0.7
k	10^7

Пример 1. (Случай $\beta_1 = \beta_2 = 1$). Значения параметров для расчетов по численной схеме (5), (6) выберем следующими: $t \in [10^{-5}, 5 \cdot 10^{-2}]$, $N = 5000$.

На рис. 1 приведен пример, который рассматривался в статьях авторов [12, 13]. Здесь мы наблюдаем взаимодействие источников: второй источник, который соответствует второму осциллятору в системе (1) больше, чем первый источник. Поэтому при отдаче энергии от второго источника, на осциллограмме (рис. 1а) мы видим возникновение трех последовательных затухающих импульсов различной формы, а на осциллограмме (рис. 1б) мы четко видим всего два импульса, а третий прослеживается не четко из-за меньшей энергии. Фазовая траектория (рис. 1с) представляет собой замкнутую фигуру, в которой отражена динамика на осциллограммах (три импульса различной формы).

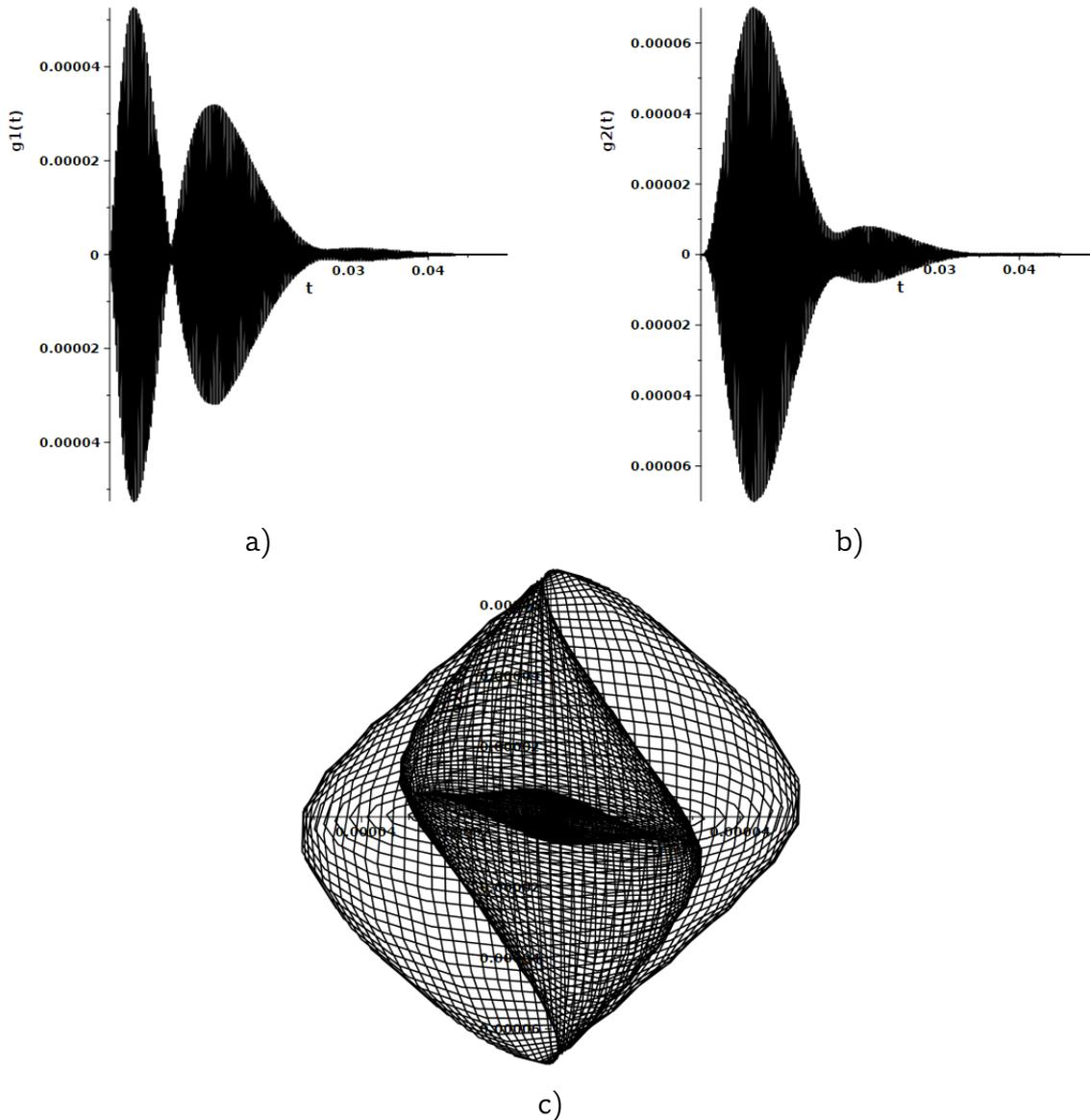


Рис. 1. Осциллограммы и фазовая траектория для Примера 1.
 [Figure 1. Oscillograms and phase trajectory for Example 1.]

Пример 2. (Случай $\beta_1 = \beta_2 \neq 1$). Значение параметров: $\beta_1 = \beta_2 = 0.9$ и $t \in [10^{-5}, 10^{-1}]$, остальные значения параметров возьмем из Примера 1.

На рис.2 мы видим, что число импульсов стало большим по сравнению с рис.1, однако количество импульсов как на рис.2а, так и на рис.2б одинаково. Заметим, что амплитуда первого импульса на осциллограмме (рис.2б) больше, чем амплитуда аналогичного импульса на рис.2а. Амплитуда второго импульса рис.2а наоборот больше амплитуды аналогичного импульса на рис.2б и далее динамика сохраняется. Число импульсов увеличилось в силу того, что значения параметров и меньше единицы, что уменьшает эффект от диссипации энергии. Фазовая траектория (рис.2с) также имеет замкнутую траекторию, как и на рис.1с. Также можно четко заметить на фазовой траектории области, отвечающие за тот или иной импульс. Таких ярко выраженных областей четыре.

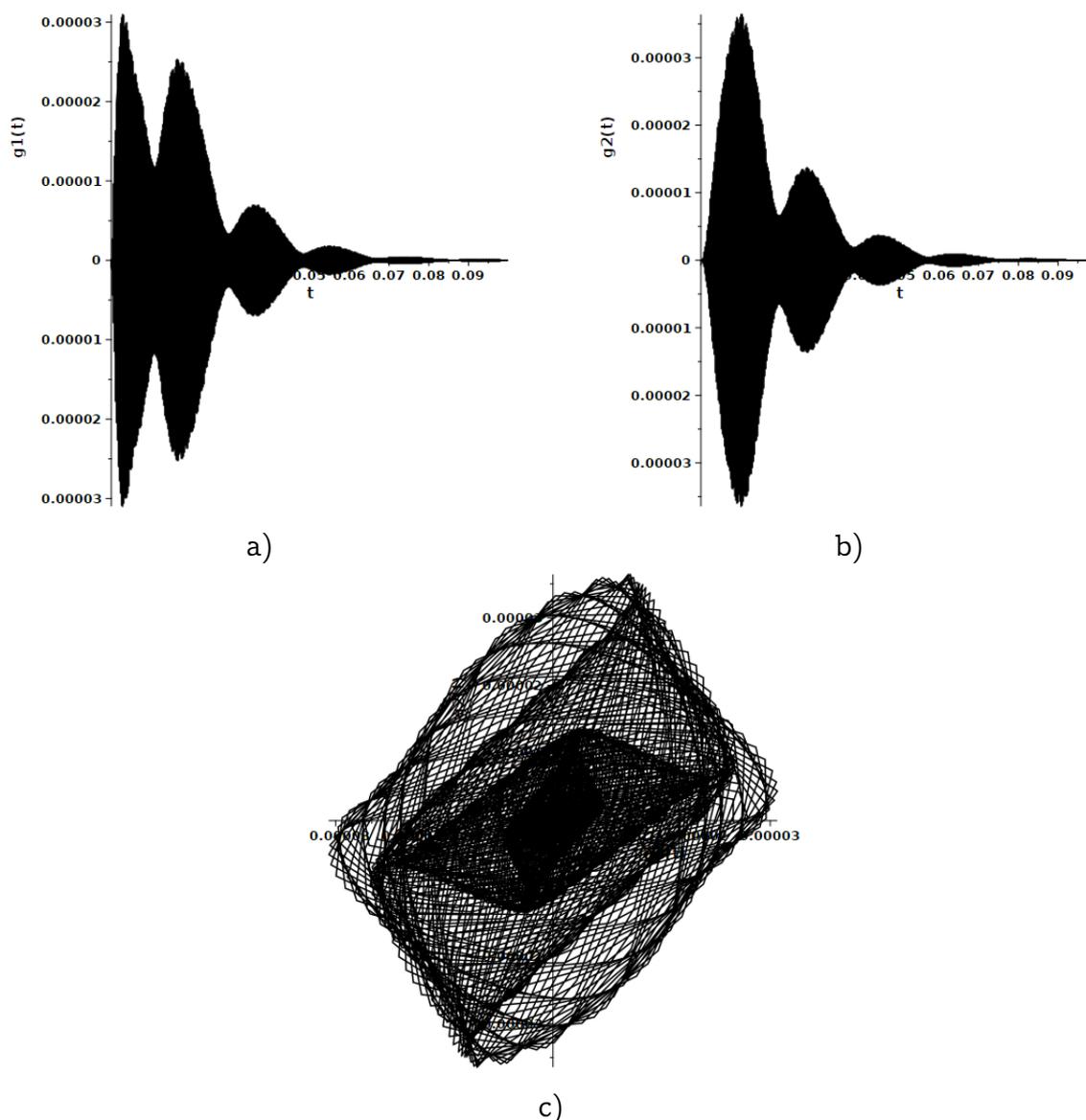


Рис. 2. Осциллограммы и фазовая траектория для Примера 2.
 [Figure 2. Oscillograms and phase trajectory for Example 2.]

Пример 3. (Случай $\beta_1 > \beta_2$). Значение параметров: $\beta_1 = 0.9$, $\beta_2 = 0.1$ и $t \in [10^{-5}, 10^{-1}]$, остальные значения параметров возьмем из Примера 1.

На рис. 3 приведен пример, когда эффект от диссипации энергии для второго осциллятора минимален ($\beta_2 = 0.1$). Мы видим, что первый импульс на осциллограмме (рис. 3b) обладает большей амплитудой не только по сравнению с аналогичным импульсом на рис. 3a, но и по сравнению с первым импульсом на рис. 2b. Кроме того, следующие импульсы на осциллограмме (рис. 3b) имеют большие амплитуды, чем на рис. 2b из Примера 2. Аналогично, мы видим похожую динамику и на рис. 3a. Такая динамика обусловлена тем, что для второго осциллятора диссипативный член играет меньшую роль и значит второй осциллятор отдает больше своей энергии первому осциллятору. Это также можно увидеть на рис 3a, здесь у второго импульса амплитуда даже больше чем у первого.

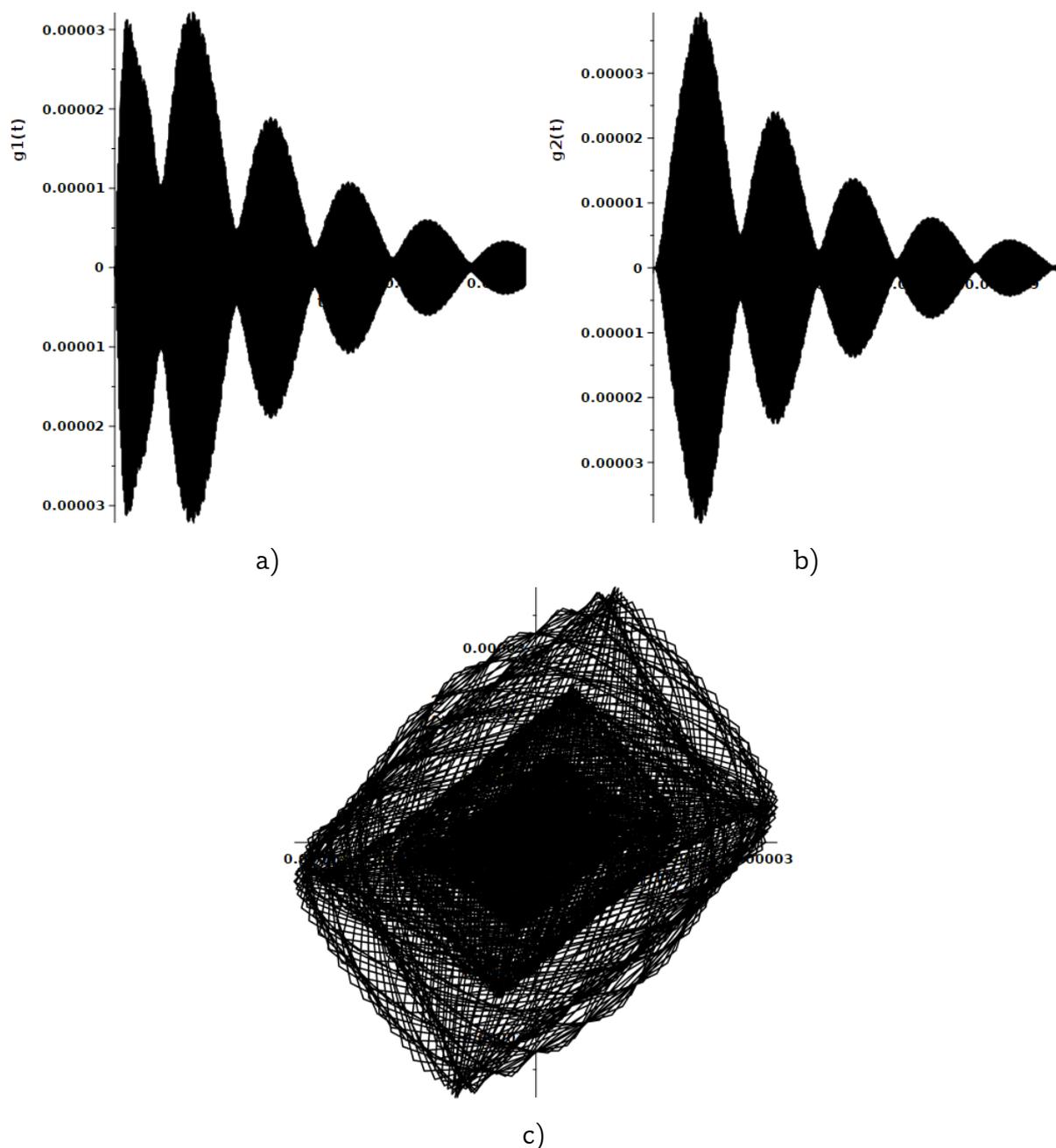


Рис. 3. Осциллограммы и фазовая траектория для Примера 3.
 [Figure 3. Oscillograms and phase trajectory for Example 3.]

На фазовой траектории (рис. 3с) мы видим динамику процесса, которая отражает множество импульсов на осциллограммах.

Отметим также, что амплитуда первого импульса на рис.3а имеет примерно такую же амплитуду, как и на первом импульсе осциллограммы (рис.2а) из Примера 2. Посмотрим, как этот эффект измениться, если мы выберем значения параметров $\beta_1 = 0.1$, $\beta_2 = 0.9$, т.е. наоборот.

Пример 4. (Случай $\beta_1 < \beta_2$). Значение параметров: $\beta_1 = 0.1$, $\beta_2 = 0.9$ и $t \in [10^{-5}, 10^{-1}]$, остальные значения параметров возьмем из Примера 1.

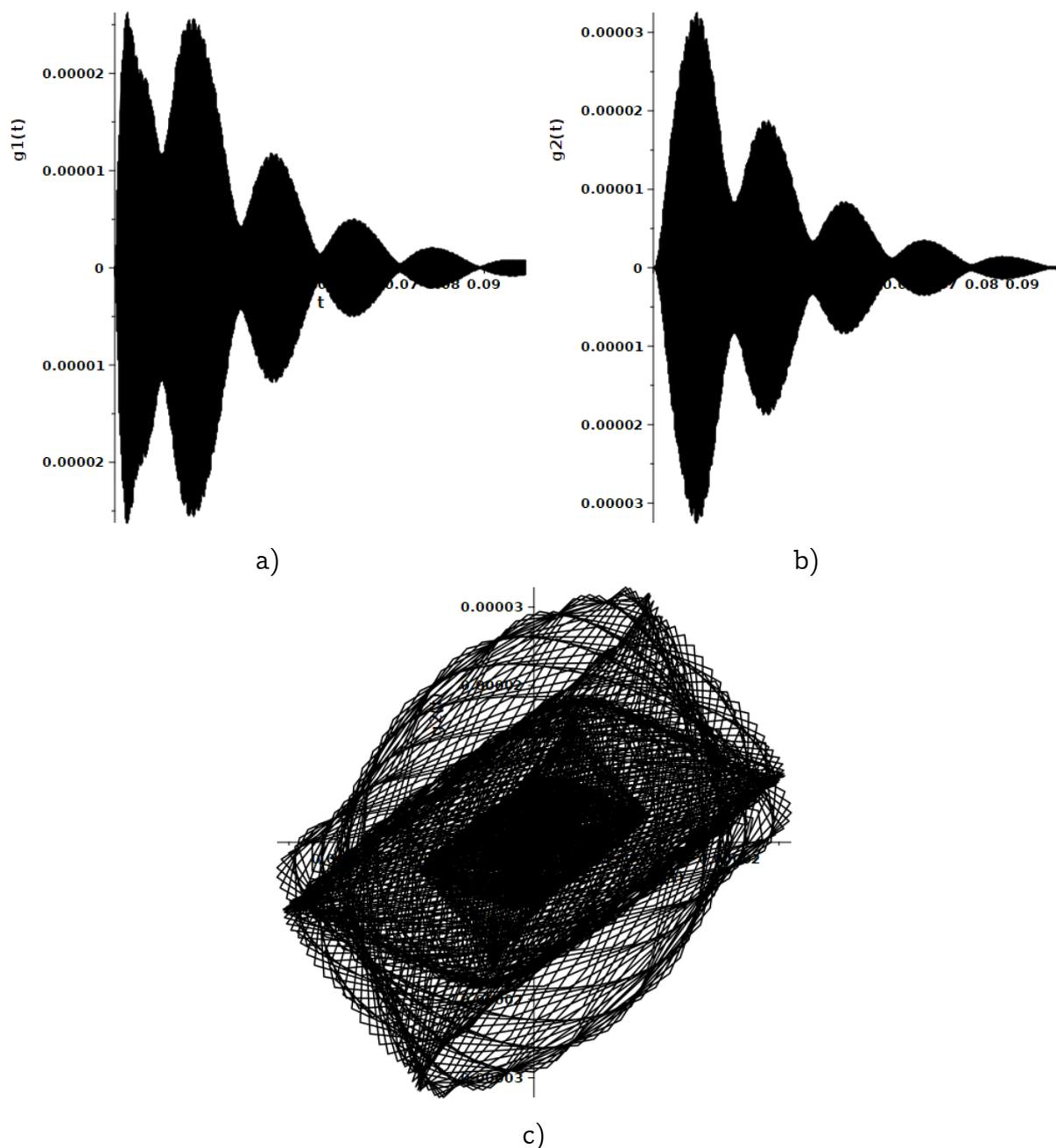


Рис. 4. Осциллограммы и фазовая траектория для Примера 4.
[Figure 4. Oscillograms and phase trajectory for Example 4.]

На рис. 4а мы видим, что амплитуда первого импульса стала меньше по сравнению с аналогичным импульсом на рис. 3а. Далее первый импульс на рис. 4а обладает меньшей амплитудой, чем первый импульс на рис. 4б, т.е. для первого импульса сохраняется динамика как из предыдущих примеров. Второй импульс на рис. 4а имеет меньшую амплитуду по сравнению с первым, но большую по сравнению со вторым импульсом на рис. 4б. Фазовая траектория на рис. 4с имеет схожую форму с фазовой траекторией на рис. 3с.

Заключение

В статье предложена новая математическая модель геоакустической эмиссии, которая обобщает ранее известную модель [12, 13]. Особенность модели – наличие эффекта наследственности, который учитывается в модельных уравнениях по средствам производных дробных порядков в диссипативных членах. Порядки дробных производных указывают на степень влияния диссипации (трения) на рассматриваемый процесс. При уменьшении значений порядков дробных производных влияние диссипации падает, что дает возможность больше энергии передавать между источниками. В работе на конкретных примерах это было показано.

Дальнейшее продолжение работы может быть связано с исследованием качественных свойств предложенной модели, а также сопоставление полученных результатов с реальными сигналами высокочастотной геоакустической эмиссии. В целом результаты статьи показали, что имеет смысл учитывать эффекты наследственности при моделировании высокочастотной геоакустической эмиссии.

Благодарность. Авторы благодарны рецензенту за тщательное прочтение статьи и ценные предложения и комментарии.

Список литературы

1. Водинчар Г.М., Пережогин А.С., Сагитова Р.Н., Шевцов Б.М. Моделирование зон геоакустической эмиссии, *Математическое моделирование*, 2007. Т. 19, № 11, С. 59–63.
2. Tristano A., Lukovenkova O., Marapulets Yu., Kim A. Improvement of methods for sparse model identification of pulsed geophysical signals, *Conf. proc. of SPA-2019. Poznan, IEEE Conf. proc. of SPA-2019. Poznan, IEEE*, С. 256–260, DOI: 10.23919/SPA.2019.8936817.
3. Marapulets Y., Rulenko O. Joint anomalies of high-frequency geoaoustic emission and atmospheric electric field by the ground–atmosphere boundary in a seismically active region (Kamchatka), *Atmosphere*, 2019. Т. 10, № 5, С. 267.
4. Marapulets Y. V., Lukovenkova O. O. Time-frequency analysis of geoaoustic data using adaptive matching pursuit, *Acoustical Physics*, 2021. Т. 67, С. 312–319.
5. Lukovenkova O., Marapulets Y., Solodchuk A. Adaptive Approach to Time-Frequency Analysis of AE Signals of Rocks, *Sensors*, 2022. Т. 22, № 24, С. 9798.
6. Marapulets Y. et al. Sound range AE as a tool for diagnostics of large technical and natural objects, *Sensors*, 2023. Т. 23, № 3, С. 1269.
7. Fa L. et al. Progress in acoustic measurements and geoaoustic applications, *AAPPS Bulletin*, 2024. Т. 34, № 1, С. 23.
8. Крылов В. В., Ланда П. С., Робсман В. А. Модель развития акустической эмиссии как хаотизация переходных процессов в связанных нелинейных осцилляторах, *Акустический журнал*, 1993. Т. 39, № 1, С. 108–122.
9. Volterra V. *Functional theory, integral and integro-differential equations*. New York: Dover Publications, 2005. 288 с.
10. Нахушев А. М. *Дробное исчисление и его применение*. Москва: Физматлит, 2003. 272 с.
11. Kilbas A. A., Srivastava H. M., Trujillo J. J. *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*. Amsterdam: Elsevier, 2006. 523 с.
12. Мингазова Д. Ф., Паровик Р. И. Некоторые аспекты качественного анализа модели высокочастотной геоакустической эмиссии, *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2023. Т. 42, № 1, С. 191–206 DOI: 10.26117/2079-6641-2023-42-1-191-206.
13. Гапеев М. И., Солодчук А. А., Паровик Р. И. Связанные осцилляторы как модель высокочастотной геоакустической эмиссии, *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2022. Т. 40, № 3, С. 88–100 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-88-100.

14. Герасимов А. Н. Обобщение законов линейной деформации и их применение к задачам внутреннего трения, *Академия наук СССР. Прикладная математика и механика*, 1948. Т. 44, № 6, С. 62–78.
15. Caputo M. Linear models of dissipation whose Q is almost frequency independent, II. *Geophysical Journal International*, 1967. Т. 13, С. 529–539.
16. Паровик Р. И. Дробная модель геоакустической эмиссии, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2023. Т. 45, № 4, С. 24–35, DOI: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-24-35.
17. Паровик Р. И. Существование и единственность задачи Коши для уравнения фрактального нелинейного осциллятора, *Узбекский математический журнал*, 2017. Т. 4, С. 110–118.
18. Parovik R. I. On a Finite-Difference Scheme for an Hereditary Oscillatory Equation, *Journal of Mathematical Sciences*, 2021. Т. 253, № 4, С. 547–557.
19. Gerhard J. What's new in Maple 2022: Formal power series, *Maple Transactions*, 2023. Т. 3, № 1, С. 547–557 DOI: 10.5206/mt.v3i1.15944.

Информация об авторах



Сергиенко Дарья Фаритовна ✉ – аспирант кафедры информатики и математики, Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский, Россия; программист лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия
 ORCID 0009-0008-6512-4537.



Паровик Роман Иванович ✉ – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования физических процессов, Институт космофизических исследований и распространений радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия
 ORCID 0000-0002-1576-1860.

References

- [1] Vodinchar G. M., Perezhogin A. S., Sagitova R. N., Shevtsov B. M. Modeling of geoacoustic emission zones. *Mathematical modeling*, 2007. Vol. 19. No. 11. pp. 59–63. (In Russian).
- [2] Tristanov A., Lukovenkova O., Marapulets Yu., Kim A. Improvement of methods for sparse model identification of pulsed geophysical signals / *Conf. proc. of SPA-2019. Poznan, IEEE*, pp. 256–260. DOI: 10.23919/SPA.2019.8936817
- [3] Marapulets Y., Rulenko O. Joint anomalies of high-frequency geoacoustic emission and atmospheric electric field by the ground–atmosphere boundary in a seismically active region (Kamchatka). *Atmosphere*. 2019. vol. 10. no 5. P. 267.
- [4] Marapulets Y. V., Lukovenkova O. O. Time-frequency analysis of geoacoustic data using adaptive matching pursuit. *Acoustical Physics*. 2021. vol. 67. pp. 312–319.
- [5] Lukovenkova O., Marapulets Y., Solodchuk A. Adaptive Approach to Time-Frequency Analysis of AE Signals of Rocks. *Sensors*. 2022. vol. 22. no. 24. 9798.
- [6] Marapulets Y. et al. Sound range AE as a tool for diagnostics of large technical and natural objects. *Sensors*. 2023. vol. 23. no. 3. P. 1269.
- [7] Fa L. et al. Progress in acoustic measurements and geoacoustic applications. *AAPPS Bulletin*. 2024. vol. 34. no. 1. P. 23.
- [8] Krylov V. V., Landa P. S., Robsman V. A. A model for the development of acoustic emission as the chaoticization of transients in coupled nonlinear oscillators, *Acoustic Journal*, 1993. vol. 39, no. 1, pp. 108–122. (In Russian).
- [9] Volterra V. *Functional theory, integral and integro-differential equations*. New York: Dover Publications, 2005. 288 p.
- [10] Nakhushev A.M. *Fractional calculus and its application*. Moscow: Fizmatlit, 2003. 272 p.(In Russian).
- [11] Kilbas A. A., Srivastava H. M., Trujillo J. J. *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*. Amsterdam: Elsevier, 2006. 523 p.
- [12] Mingazova D.F., Parovik R.I. Some aspects of the qualitative analysis of the high-frequency geoacoustic emission model. *Vestnik KRAUNTS. Physical and mathematical sciences*. 2023.T. 42. No. 1. pp. 191-206. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-42-1-191-206(In Russian).
- [13] Gapeev M.I., Solodchuk A.A., Parovik R.I. Coupled oscillators as a model of high-frequency geoacoustic emission. *Vestnik KRAUNTS. Physical and mathematical sciences*. 2022. Vol. 40. No. 3. pp. 88-100. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-88-100hep-th/0501074(In Russian).
- [14] Gerasimov A. N. Generalization of the laws of linear deformation and their application to problems of internal friction. *Academy of Sciences of the SSR. Applied Mathematics and Mechanics*, 1948. Vol. 44, No. 6, pp. 62-78. (in Russian) (In Russian).
- [15] Caputo M. Linear models of dissipation whose Q is almost frequency independent – II. *Geophysical Journal International*. 1967. vol. 13. pp. 529-539.
- [16] Parovik R.I. Fractional model of geoacoustic emission. *Vestnik KRAUNTS. Physical and mathematical sciences*. 2023.T. 45. No. 4. pp. 24-35. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-24-35 (In Russian).
- [17] Parovik R. I. Existence and uniqueness of the Cauchy problem for a fractal nonlinear oscillator equation. *Uzbek Mathematical Journal*. 2017. no. 4. P. 110-118. (In Russian).
- [18] Parovik R. I. On a Finite-Difference Scheme for an Hereditary Oscillatory Equation. *Journal of Mathematical Sciences*. 2021. vol. 253. no. 4. P. 547-557.
- [19] Gerhard J. What’s new in Maple 2022: Formal power series. *Maple Transactions*. 2023. vol. 3. no. 1. DOI: 10.5206/mt.v3i1.15944.

Information about authors



Sergienko Daria Faritovna✉ – aspirant of the Department of Mathematics and Computer Science, Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; programmer of the Laboratory of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, S. Paratunka, Russia
ORCID 0009-0008-6512-4537.



Parovik Roman Ivanovich✉ – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Modeling Physical Processes, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, S. Paratunka, Russia
ORCID 0000-0002-1576-1860.



Комплекс программ моделирования геодинамо на основе спектральных эредитарных моделей

Г. М. Водинчар*, Е. А. Казаков, Л. К. Фещенко

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Паратунка, Камчатский край, ул. Мирная, 7, Россия

Аннотация. Исследование задачи геодинамо часто проводят на основе спектральных моделей, когда поля задачи полностью или частично раскладываются по собственным полям (модам) подходящих спектральных задач. Наиболее осмысленными с физической точки зрения являются спектральные задачи о свободных колебаниях или свободном затухании полей. Составление спектральных моделей прежде всего требует расчета параметров базисных мод, а затем и коэффициентов модели. Чаще всего это коэффициенты Галеркина. Затем возникает задача собственно численного решения уравнений модели. В работе описывается разработанный авторами комплекс программ, позволяющий решать такие задачи. Он включает в себя модули расчета параметров мод, модуль расчета коэффициентов Галеркина, два модуля численного решения системы, модуль генерации шума. Комплекс позволяет вести расчет модели с эредитарным подавлением α -эффекта энергии поля. Предусмотрено два типа ядер функционала подавления, требующих различных разностных схем. Эти схемы реализованы в двух модулях численного решения. Случайный шум имитирует влияние спонтанной синхронизации мелкомасштабных компонент полей, которое в среднем отсутствует. Расчет параметров базисных мод и коэффициентов Галеркина выполняется с помощью комбинированных символьно-численных вычисления, поэтому соответствующие модули реализованы в пакете Maple. Необходимость символьных вычислений связана с большой сложностью выражений самих мод и подынтегральных выражений при расчете коэффициентов Галеркина. Поэтому возникает задача прежде всего формировать необходимые выражения. Это и делается с помощью символьных вычислений. Остальные модули реализованы на C++. Разработанный комплекс может быть полезен специалистам, изучающим задачу геодинамо на основе спектральных моделей и эффекты памяти в этой задаче.

Ключевые слова: геодинамо, спектральные модели, модели с памятью, комплексы программ моделирования, символьно-численные вычисления

Получение: XX.11.2024; Исправление: XX.11.2024; Принятие: XX.11.2024; Публикация онлайн: XX.11.2024

Для цитирования. Водинчар Г. М., Казаков Е. А., Фещенко Л. К. Комплекс программ моделирования геодинамо на основе спектральных эредитарных моделей // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 34-53. EDN: QYHFFU. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-34-53>.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 22-11-0064 «Моделирование динамических процессов в геосферах с учетом наследственности» <https://rscf.ru/project/22-11-00064/>).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

***Корреспонденция:** ✉ E-mail: gvodinchar@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License



© Водинчар Г. М., Казаков Е. А., Фещенко Л. К., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



Geodynamo simulations software package suite based on spectral hereditary models

*G. M. Vodinchar**, *E. A. Kazakov*, *L. K. Feshchenko*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS,
684034, Paratynka, Kamchatka, Mirnaya str., 7, Russia

Abstract. The study of the geodynamics problem is often carried out on the basis of spectral models, when the fields are fully or partially expanded in eigenfields (eigenmodes) of suitable spectral problems. The most meaningful from the physical point of view are spectral problems of free oscillations or free decay of fields. The compilation of spectral models first of all requires calculating the parameters of the basic modes, and then the model coefficients. Most often, these are the Galerkin coefficients. Then the problem of actually solving the model equations numerically arises. The paper describes a software package developed by the authors that allows solving such problems. It includes modules for calculating the mode parameters, a module for calculating the Galerkin coefficients, two modules for numerically solving the system, and a noise generation module. The package allows calculating the model with hereditary quenching of the α -effect by the field energy. Two types of the quenching functional kernel are provided, requiring different difference schemes. These schemes are implemented in two numerical solution modules. Random noise simulates the effect of spontaneous synchronization of small-scale field components, which is absent on average. The calculation of the parameters of the basic modes and Galerkin coefficients is performed using combined symbolic-numerical computations, so the corresponding modules are implemented in the Maple package. The need for symbolic computations is associated with the great complexity of the expressions of the modes themselves and the integrands when calculating the Galerkin coefficients. Therefore, the task arises first of all to form the necessary expressions. This is done using symbolic calculations. The remaining modules are implemented in C++. The developed package can be useful for specialists studying the geodynamo problem based on spectral models and memory effects in this problem.

Key words: geodynamo, spectral models, memory models, simulation software packages, symbolic-numerical computations.

Received: XX.11.2024; Revised: XX.11.2024; Accepted: XX.11.2024; First online: XX.11.2024

For citation. Vodinchar G.M., Kazakov E.A., Feshchenko L.K. Geodynamo simulations software package suite based on spectral hereditary models. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 34-53. EDN: QYHFFU. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-34-53>.

Funding. This research was funded by Russian Science Foundation grant number 22-11-00064 <https://rscf.ru/project/22-11-00064/>.

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: gvodinchar@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Vodinchar G. M., Kazakov E. A., Feshchenko L. K., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Задача геодинamo представляет собой задачу о магнитогидродинамической конвекции проводящей вязкой несжимаемой жидкости во вращающейся сферической оболочке с твёрдыми границами (внешнее ядро Земли) [1–3]. Система уравнений геодинamo связывает поля скорости, давления, температуры и магнитной индукции и включает уравнения Навье-Стокса с кориолисовым и лоренцевым членами, уравнение температуропроводности и уравнение индукции.

Для её исследования применяют различные численные методы, в том числе и метод Галеркина. Следует отметить, что, хотя метод Галеркина и является по своему происхождению численным методом решения уравнений, его можно рассматривать при малом числе мод как способ построения малоразмерных моделей [4,5]. Поля задачи при однородных граничных условиях представляются в виде линейных комбинаций стационарных базисных полей (мод) с зависящими от времени амплитудами. Каждое базисное поле должно удовлетворять граничным условиям, что гарантирует точное выполнение этих условий при любых амплитудах. Геометрически метод Галеркина выполняет тогда проектирование исходных уравнений на подпространства, порождаемые модами разложения.

В случае малоразмерных (маломодовых) моделей необязательна полнота систем используемых мод, достаточно, чтобы они обладали хорошими аппроксимирующими свойствами. Поэтому возникает вопрос о выборе естественного базиса. Пожалуй, наиболее естественными пространственными структурами полей будут структуры мод свободных затуханий, именно они используются при построении спектральных моделей. Применение процедуры метода Галеркина дает динамическую систему для амплитуд мод. Эта система вместе с набором мод и образует спектральную модель [6, 7].

В случае маломодовых моделей, содержащих только крупномасштабные моды, необходимо включать в уравнения динамо в явном виде альфа-эффект. Он описывает генерацию крупномасштабного поля турбулентными мелкомасштабными вихрями. Чтобы избежать неограниченного роста, необходима и обратная связь в виде подавления альфа-эффекта энергией этого поля [8, 9]. Известно, что в турбулентных магнитогидродинамических системах проявляется свойство памяти [10], поэтому подавление α -эффекта в рассматриваемых моделях вводится с учетом этого свойства, а именно, подавление определяется не только актуальным, но и всеми предшествующими значениями энергии. Математически это формализуется в виде функционала от энергии с разностным ядром, и уравнения модели являются интегро-дифференциальными. Для некоторых частных типов ядер возможно сведение уравнений только к дифференциальным. Крупномасштабные приближения неявно предполагают, что влияние мелкомасштабных мод в среднем нулевое. Однако эти моды могут спонтанно синхронизироваться на случайное время, оказывая влияние на генерацию. В модели это введено как аддитивная поправка в интенсивность альфа-эффекта в виде случайного процесса, представляющего собой последовательность

прямоугольных импульсов, возникающих в случайные моменты, имеющих случайную длительность и гауссовскую, в среднем нулевую, амплитуду.

Для автоматизированного составления описанных моделей и проведения численного моделирования разработан программный комплекс комбинированных символьно-численных вычислений, описываемый в настоящей работе.

Уравнения эредитарной спектральной модели

Опишем прежде всего, что из себя представляют спектральные модели, для расчета параметров которых и дальнейшего численного решения разработан вычислительный комплекс.

Жидкое ядро Земли рассматривается как сферическая оболочка вязкой проводящей жидкости с твердыми границами, равномерно вращающейся вокруг оси Oz. В сферической системе координат (r, θ, φ) внутренняя граница ядра (ICB) определяется как $r = r_i$, а граница ядро – мантия (CMB) как $r = r_o$. Температура на ICB и CMB постоянна и равна T_i и T_o соответственно.

В качестве единицы длины принимается внешний радиус Земли, а в качестве единицы температуры принимается $\delta T = T_i - T_o$. Тогда в этих единицах $r_o = 1$, $r_i = 0.35$ и $T_o = T_+ 1$.

Поле $T = T(r, t)$ задает отклонение температуры относительно равновесного профиля (без конвекции)

$$T_s = \frac{r_i}{1 - r_i} \left(\frac{1}{r} - 1 \right) + T_i - 1.$$

Обезразмеренные уравнения геодинамо в ядре ($r \leq 1$) имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v &= -\nabla p + \Delta v - 2E^{-1} e_z \times v + RaPr^{-1} T r + \text{rot} B \times B, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + (v \cdot \nabla) (T + T_s) &= Pr^{-1} \Delta T, \\ \frac{\partial B}{\partial t} &= \text{rot} (v \times B) + R_\alpha \text{rot} (\alpha(r) B) + Pm^{-1} \Delta B, \\ \nabla v &= 0, \quad \nabla B = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\alpha(r) = a(r) \cos \theta$ – заданное осесимметричное поле тензора параметризованного α -эффекта.

Параметры подобия: E – число Экмана, Ra – число Релея, Pr – число Прандтля, Pm – магнитное число Прандтля, R_α – амплитуда α -эффекта.

Среда вне ядра предполагается непроводящей (токи отсутствуют), значит, при $r > 1$:

$$B = -\nabla \Psi, \quad \text{где } \Delta \Psi = 0. \tag{2}$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} v(r = r_i) = v(r = 1) &= 0, \quad T(r = r_i) = T(r = 1) = 0, \\ B(r = 0) < \infty, \quad B = -\nabla \Psi \text{ при } r = 1, \quad \Psi(r = +\infty) &= 0. \end{aligned} \tag{3}$$

Общее решение уравнения (2) в виде разложения по сферическим функциям прекрасно известно [11], поэтому решать надо только задачу (1), а выражение для Ψ дает граничные условия для аналогичного (по сферическим функциям) разложения поля внутри ядра [7].

Поля скорости внутри ядра аппроксимируются конечными линейными комбинациями стационарных полей (мод):

$$v(r, t) = \sum_{l=1}^{L_{\max}} \beta_l(t) v_l(r), \quad T(r, t) = \sum_{s=1}^{S_{\max}} \alpha_s(t) T_s(r), \quad B(r, t) = \sum_{p=1}^{P_{\max}} \gamma_p(t) B_p(r). \quad (4)$$

Базисные моды являются модами свободного затухания полей, т.е. решениями спектральных задач

$$\begin{aligned} \mu v - \nabla p + \Delta v &= 0, \quad \nabla v = 0, \\ \lambda T + \Delta T &= 0, \\ \eta B + \Delta B &= 0, \quad \nabla B = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

с соответствующими граничными условиями. Расчет собственных значений и собственных мод этих задач подробно описан в [7].

Операторы этих задач самосопряжены относительно скалярных произведений:

$$\begin{aligned} \langle v_1, v_2 \rangle_v &= \iiint_{r_i \leq r \leq 1} v_1 v_2 dV = \int_{r_i}^1 r^2 dr \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_{-\pi}^\pi v_1 v_2 d\varphi, \\ \langle T_1, T_2 \rangle_T &= \iiint_{r_i \leq r \leq 1} T_1 T_2 dV = \int_{r_i}^1 r^2 dr \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_{-\pi}^\pi T_1 T_2 d\varphi, \\ \langle B_1, B_2 \rangle_B &= \iiint_{0 \leq r \leq 1} B_1 B_2 dV = \int_0^1 r^2 dr \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_{-\pi}^\pi B_1 B_2 d\varphi, \end{aligned} \quad (6)$$

Системы собственных мод полны и ортогональны. Их можно считать нормированными.

Каждая мода скорости и магнитного поля определяется мультииндексами вида (k, n, m, type) , где k , n и m соответствуют дискретизации спектра по r , θ и φ соответственно, а type – бинарный индекс типа моды: тороидальная или полоидальная. Температурные моды определяются мультииндексами (k, n, m) .

Подстановка разложений (4) в уравнения геодинамики и применение процедуры Галеркина дает динамическую систему для амплитуд:

$$\begin{aligned} \frac{d\beta_l}{dt} &= \sum_{i,j=1}^{L_{\max}} B_{lij} \beta_i \beta_j - \mu_l \beta_l + E^{-1} \sum_{i=1}^{L_{\max}} E_{li} \beta_i + RaPr^{-1} \sum_{i=1}^{S_{\max}} C_{li} \alpha_i + \sum_{i,j=1}^{P_{\max}} Q_{lij} \gamma_i \gamma_j, \\ l &= 1, \dots, L_{\max}, \\ \frac{d\alpha_s}{dt} &= \sum_{i,j=1}^{L_{\max}, S_{\max}} F_{sij} \beta_i \alpha_j + \sum_{i=1}^{L_{\max}} H_{si} \beta_i - Pr^{-1} \lambda_s \alpha_s, \quad s = 1, \dots, S_{\max}, \\ \frac{d\gamma_p}{dt} &= \sum_{i,j=1}^{L_{\max}, P_{\max}} W_{pij} \beta_i \gamma_j + R_\alpha \sum_{i=1}^{P_{\max}} W_{pij}^\alpha \gamma_i - Pm^{-1} \eta_p \gamma_p, \quad p = 1, \dots, P_{\max}. \end{aligned} \quad (7)$$

В этой системе $\mu_l > 0$, $\lambda_s > 0$ и $\eta_p > 0$ – собственные значения, а прописные буквы – постоянные коэффициенты Галеркина, определяемые скалярными произведениями:

$$\begin{aligned} B_{lij} &= -\langle (v_i \nabla) v_j, v_l \rangle_v, \quad E_{li} = -2\langle e_z \times v_i, v_l \rangle_v, \quad C_{li} = \langle T_i r, v_l \rangle_v, \\ Q_{lij} &= \langle \text{rot} B_i \times B_j, v_l \rangle_v, \quad F_{sij} = -\langle v_i (\nabla T_j), T_s \rangle_T, \quad H_{si} = \frac{r_i}{1-r_i} \langle r^{-2} v_i e_r, T_s \rangle_T, \\ W_{pij} &= \langle \text{rot} (v_i \times B_j), B_s \rangle_v, \quad W_{pi}^\alpha = \langle \text{rot} (\alpha(r) B_i), B_s \rangle_v. \end{aligned} \quad (8)$$

Спектральная модель геодинамики – это набор мод и система уравнений (7). Если число мод невелико, говорят о маломодовой модели.

В модель вводится эрдитарное подавление α -эффекта энергией поля и случайное возмущение α -эффекта $\xi(t)$ в виде:

$$R_\alpha \mapsto \frac{R_\alpha (1 + \xi(t))}{1 + z(t)}, \quad z(t) = \frac{1}{T_K} \int_0^t K\left(\frac{t-\tau}{T_K}\right) \sum_{p=1}^{P_{\max}} \gamma_p^2(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где безразмерная $K(t)$ – ядро функционала подавления со свойствами $K(t) \geq 0$, $K(+\infty) = 0$ и $\max_{t \geq 0} K(t) = 1$. Параметр T_K задает временной масштаб ядра.

Для численного решения система уравнений (7)-(9) дополняется начальными значениями для амплитуд мод:

$$\begin{aligned} \beta_l(0) &= \beta_l^0, \quad \alpha_s(0) = \alpha_s^0, \quad \gamma_p(0) = \gamma_p^0, \\ l &= 1, \dots, L_{\max}, \quad s = 1, \dots, S_{\max}, \quad p = 1, \dots, P_{\max}. \end{aligned} \quad (10)$$

Стохастический процесс $\xi(t)$, описывает влияние когерентных структур, спонтанно образованных мелкомасштабными модами, не учитываемыми явно в модели. В зависимости от морфологии каждой структуры она может как усиливать, так и ослаблять генерацию поля, а среднее значение этого влияния должно быть равно нулю.

Опишем модельную структуру этого процесса. Предположим, что k -ая когерентная структура ($k = 1, 2, \dots$) спонтанно образуется в случайный момент

времени φ_k и саморазрушается в случайный момент времени θ_k . Возможностью одновременного существования двух или более структур пренебрегаем. Пусть также $\theta_0 = 0$.

Тогда случайное время ожидания структуры $\tau_k^W = \varphi_k - \theta_{k-1}$, а случайное время ее существования $\tau_k^E = \theta_k - \varphi_k$. Интенсивность влияния k -ой структуры на генерацию поля описывается величинами ξ_k . Все эти три класса величины предполагаются независимыми между собой при различных k и одинаково распределенными в пределах одного класса.

Величины ξ_k гауссовские $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$, времена ожидания τ_k^W распределены по степенному закону с плотностью

$$p_W(t) = \frac{\nu - 1}{c\Gamma^W} \left(1 + \frac{t}{c\Gamma^W}\right)^{-\nu}, \quad \Gamma^W > 0, \quad c = \left(2^{\frac{1}{\nu-1}} - 1\right)^{-1}, \quad \nu > 1, \quad t \geq 0, \quad (11)$$

а времена существования τ_k^E распределены по показательному закону с плотностью

$$p_E(t) = \frac{\ln 2}{\Gamma^E} \exp\left(-\frac{\ln 2}{\Gamma^E} t\right), \quad \Gamma^E > 0, \quad t \geq 0. \quad (12)$$

Параметры Γ^W и Γ^E имеют смысл медиан соответствующих случайных величин, принимаемых в качестве характерных времен ожидания и существования. Использование медиан вместо традиционных математических ожиданий в качестве характерных значений связано с тем, что у степенного распределения (11) при $\nu \leq 2$ математическое ожидание бесконечно.

Случайный процесс $\xi(t)$ определяется следующим образом:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} \xi_k [H(t - \tau_k) - H(t - \theta_k)], \quad (13)$$

где $H(\cdot)$ – функция Хевисайда. Он представляет собой последовательность прямоугольных импульсов с амплитудами ξ_k , возникающих в моменты φ_k и исчезающих в моменты θ_k . Между импульсами процесс нулевой.

Варьируя наборы базисных мод, представляемых мультииндексами, и типы ядер, получаем широкий класс спектральных эредитарных моделей.

Структура комплекса

Представляемый вычислительный комплекс моделирования геодинамо предназначен для составления уравнений (7)–(9)), т.е. расчета коэффициентов Галеркина и собственных значений, генерации реализаций шума $\xi(t)$ и численного решения уравнений с заданными начальными значениями амплитуд.

Структура комплекса представлена на рис. 1.

Приведем здесь общее описание комплекса, а далее опишем каждый расчетный модуль. В пополняемых файлах коэффициентов хранятся значения коэффициентов Галеркина, идентификаторами которых являются мультииндексы мод.

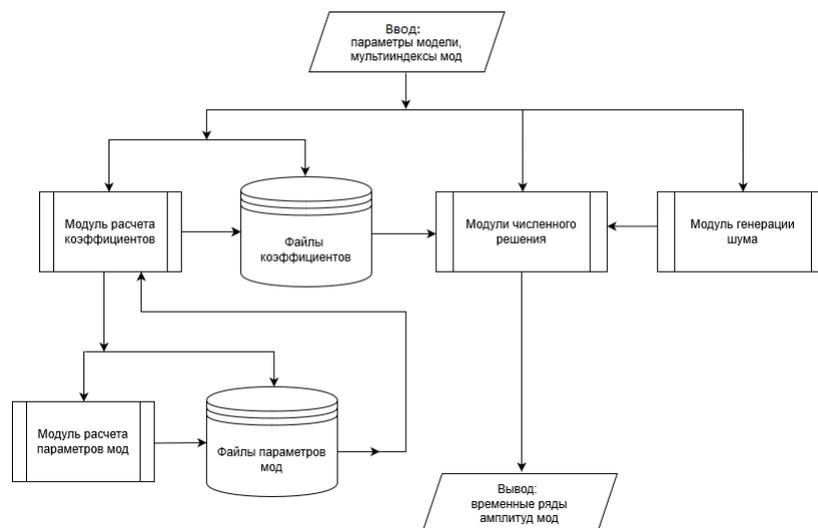


Рис. 1. Структура комплекса.

Figure 1. Structure of the complex.

В пополняемых файлах параметров мод хранятся собственные значения и числовые параметры мод с идентификаторами в виде мультииндексов.

Исходными данными на входе являются параметры подобия, количества мод L_{\max} , S_{\max} , P_{\max} , тип и параметры ядра $K(t)$, параметры процесса $\xi(t)$, время моделирования T_{\max} и шаг временной сетки h .

Общая схема работы следующая:

1. По заданным мультииндексам идет обращение в файлы коэффициентов Галеркина. Если все необходимые коэффициенты в файлах есть, они передаются в модули численного решения. Если каких-то коэффициентов нет, соответствующие мультииндексы передаются на вход модуля расчета коэффициентов.
2. Модуль расчета коэффициентов обращается в файлы параметров мод по заданным мультииндексам. Если параметры всех необходимых мод в файлах есть, производится расчет коэффициентов, они дописываются в файл и передаются в модули численного решения. Если параметров каких-либо мод нет, соответствующие мультииндексы передаются в модуль расчета параметров мод.
3. Модуль расчета параметров проводит вычисления для заданных мультииндексов, пополняет файлы параметров мод и передает параметры в модуль расчета коэффициентов Галеркина.
4. По значениям параметров на входе комплекса и коэффициентам Галеркина как по входным данным работает один из двух модулей численного решения. Выбор одного из двух типов определяется типом ядра подавления. Подробнее это описано ниже в работе.

5. В процессе работы на каждом шаге по времени модуль численного решения обращается к модулю генерации шума за реализацией очередного шумового отсчета.
6. Результатом работы является файл временных рядов решений уравнений модели. Структура этого файла описана ниже.

Из такой организации работы видно, что в процессе эксплуатации будет происходить пополнение файлов параметров мод и коэффициентов, поэтому обращение к модулям их расчета будет происходить все реже.

Модули расчет параметров базисных мод

Собственные тороидальные моды скорости и магнитной индукции v_{knm}^T и B_{knm}^T , собственные полоидальные моды скорости и магнитной индукции v_{knm}^P и B_{knm}^P , собственные моды температуры T_{knm} определяются выражениями

$$\begin{aligned} v_{knm}^T &= \text{rot} (R_{kn}^T(r) Y_n^m(\theta, \varphi) r), & B_{knm}^T &= \text{rot} (X_{kn}^T(r) Y_n^m(\theta, \varphi) r), \\ v_{knm}^P &= \text{rot rot} (R_{kn}^P(r) Y_n^m(\theta, \varphi) r), & B_{knm}^P &= \text{rot rot} (X_{kn}^P(r) Y_n^m(\theta, \varphi) r), \\ T_{knm} &= Z_{kn}(r) Y_n^m(\theta, \varphi), \end{aligned} \quad (14)$$

где $Y_n^m(\theta, \varphi)$ – сферические гармоники, а функции радиальной переменной r задаются в виде

$$\begin{aligned} R_{kn}^T(r) &= A_{kn}^T j_n(\sqrt{\mu_{kn}^T} r) + B_{kn}^T y_n(\sqrt{\mu_{kn}^T} r), \\ X_{kn}^T(r) &= a_{kn}^T j_n(\sqrt{\eta_{kn}^T} r) + b_{kn}^T y_n(\sqrt{\eta_{kn}^T} r), \\ R_{kn}^P(r) &= C_{kn}^1 j_n(\sqrt{\mu_{kn}^P} r) + C_{kn}^2 y_n(\sqrt{\mu_{kn}^P} r) + C_{kn}^3 r^n + C_{kn}^4 r^{-n-1}, \\ X_{kn}^P(r) &= a_{kn}^P j_n(\sqrt{\eta_{kn}^P} r) + b_{kn}^P y_n(\sqrt{\eta_{kn}^P} r), \\ Z_{kn}(r) &= a_{kn} j_n(\sqrt{\lambda_{kn}} r) + b_{kn} y_n(\sqrt{\lambda_{kn}} r). \end{aligned} \quad (15)$$

В формулах (14) и (15) индекс $n = 1, 2, \dots$ у мод скорости и магнитного поля, и $n = 0, 1, 2, \dots$ у мод температуры. Индексы $k = 0, 1, 2, \dots$ и $m = -n, \dots, n$. Положительные μ_{kn}^T , μ_{kn}^P , η_{kn}^T , η_{kn}^P и λ_{kn} являются собственными значениями соответствующих мод, а прочие коэффициенты в (15) определяются из соответствующих граничных и нормировочных условий. Эти условия ставятся на функции (15) в результате применения условий (3) к модами типа (14). Уравнения на собственные значения и нормировочные условия приведены в работе [7].

Видно, что расчет собственных мод сводится к расчету собственных значений и коэффициентов в выражениях (15). Именно эти вычисления и проводит модуль расчета базисных мод.

Уравнения на собственные значения очень громоздкие, как и нормировочные условия, имеющие интегральную форму. Кроме того, нормировочные интегралы для магнитных мод являются несобственными второго рода. Поэтому модуль разработан в пакете Maple (лицензия № 910346) и сочетает в себе символьные и численные вычисления. Технология расчета параметров мод с помощью Maple очень подробно описана в работе [7], поэтому здесь ограничимся общей схемой работы модуля.

На входе модуля: массивы мультииндексов мод скорости, температуры и магнитной индукции, для которых необходимо рассчитать собственные значения и коэффициенты из (15).

Схема работы модуля:

1. Программно формируется выражение радиальной функции моды.
2. Аналитически вычисляется норма с неопределенными собственными значениями и коэффициентами.
3. Программно формируется выражение левой части уравнения на собственные значения.
4. Численно решается уравнение, находятся собственные значения.
5. Численно определяются коэффициенты моды.
6. Собственные значения и коэффициенты подставляются в выражение для нормы и производится пересчет коэффициентов для получения единичной нормы.

На выходе модуля: массивы собственных значений и параметров радиальных функций из (15).

Модуль расчета коэффициентов Галеркина

Коэффициенты Галеркина представляют собой интегралы по объему жидкого ядра от очень громоздких мультипликативных комбинаций базисных мод и операторов векторного анализа в сферических координатах. Сами моды сложным образом выражаются через сферические гармоники (по переменным θ и φ) и сферические функции Бесселя (по радиальной переменной r). Все это в совокупности приводит к очень сложным подынтегральным выражениям, которые проблематично даже безошибочно ввести вручную в код расчетной программы.

По этой причине модуль также реализован в пакете Maple на основе сочетания символьных и численных вычислений. Этот пакет содержит библиотеку VectorCalculus, в которой реализованы стандартные операции векторного анализа в различных системах координат, в том числе и в сферических. Использование комбинированных типов вычислений позволяет также вести частично аналитическое интегрирование, что повышает надежность расчета коэффициентов.

Технология расчета коэффициентов очень подробно описана в работе [7], где приведены даже ключевые фрагменты кода Maple, поэтому здесь ограничимся описанием общей схемы работы модуля.

На входе модуля: массивы мультииндексов мод скорости, температуры и магнитной индукции, для которых необходимо рассчитать коэффициенты Галеркина.

Схема работы модуля:

1. На основе значений мультииндексов и общих формул (14) программно вычисляются алгебраические выражения мод v_l , T_s , B_p с неопределенными радиальными функциями $R_l(r)$, $Z_s(r)$, $X_p(r)$. Зависимости от θ и φ в этих выражениях будут заданы явно.
2. Программно формируются подынтегральные выражения для коэффициентов Галеркина (8).
3. Выполняется аналитическое интегрирование по поверхности сферы (θ, φ) . Результатом этого интегрирования будет либо нуль, либо выражения, зависящие от переменной r , неопределенных функций $R_l(r)$, $Z_s(r)$, $X_p(r)$ и их производных.
4. В случае ненулевого результата подставляются явные выражения для радиальных функций (15) с числовыми значениями параметров мод и выполняется численное интегрирование по радиальной переменной.

На выходе модуля: массивы числовых значений коэффициентов Галеркина.

Необходимо сделать следующее замечание. Каждый коэффициент Галеркина имеет смысл меры взаимодействия мод в процессе, связанном с соответствующим членом уравнений геодинamo. Например W_{sij} – это мера эффективности генерации моды B_s из моды B_j за счет моды скорости v_i . Аналитическое интегрирование позволяет определять точно нулевые коэффициенты, что возможность выделять цепочки взаимодействующих мод.

В настоящее время ведется переработка модуля в свободной системе символьных вычислений SymPy с целью ухода от коммерческого Maple. В SymPy, как и в Maple, реализованы операции векторного анализа в различных ортогональных системах координат.

Модуль генерации шума

Прежде всего опишем формулы, с помощью которых в модуле генерируются реализации случайных величин, определяющих случайный процесс $\xi(t)$. Это три типа величин, которые по определению процесса независимы между собой и, соответственно, могут генерироваться независимо друг от друга: случайное время ожидания k -го прямоугольного импульса τ_k^W , случайное время существования этого импульса τ_k^E и случайная амплитуда импульса ξ_k .

Для генерации случайных времен используется метод обратных функций [12]. Легко получить по схеме этого метода, что величины τ_k^W и τ_k^E при заданных плотностях распределения $p_W(t)$ (11) и $p_E(t)$ (12) можно генерировать по формулам

$$\tau_k^W = cT^W \left(U_1^{1/(1-\nu)} - 1 \right) \quad \text{и} \quad \tau_k^E = -\frac{T^E}{\ln 2} \ln U_2, \quad (16)$$

где U_1 и U_2 равномерно распределены на отрезке $[0; 1]$ и независимы между собой и при различных k .

Для генерации случайных амплитуд ξ_k используется стандартный метод Бокса-Мюллера [12]:

$$\xi_k = \sigma \sqrt{-2 \ln U_3} \cos(2\pi U_4), \quad (17)$$

где U_3 и U_4 также равномерно распределены на отрезке $[0; 1]$ и независимы между собой и при различных k .

Реализующие численное решение уравнений модели (7)–(10) модули комплекса выполняют расчет на временной разностной сетке, причем на каждом шаге вычисляются значения решений в очередном временном узле t_{n+1} по их значениям в одном или нескольких предшествующих узлах. Поэтому модуль генерации шума $\xi(t)$ должен формировать реализацию $\xi^{n+1} = \xi(t_{n+1})$ по уже известной $\xi^n = \xi(t_n)$, т.е. по схеме «от текущего ξ в момент t , к следующему ξ^{next} в момент $t^{next} = t + h$ ». Именно эта схема и реализуется в модуле генерации шума.

На входе модуль получает следующие параметры и переменные:

- медианное значение T^W , порядок ν и параметр $c = \left(2^{\frac{1}{\nu-1}} - 1\right)^{-1}$ степенного распределения (11) времени ожидания импульса;
- медианное значение T^E экспоненциального распределения (12) времени существования импульса T^E ;
- стандартное отклонение σ нормального распределения амплитуды импульса;
- булеву переменную текущего состояния процесса pulse (нет импульса – «false», есть импульс – «true»);
- текущее состояние процесса ξ ;
- ближайшее время переключения switch_time;
- временной шаг h между моментами t и t^{next} .

На выходе модуль возвращает:

- булеву переменную состояния процесса pulse в момент t^{next} (возможно, измененную по сравнению со входной);
- следующее состояние процесса ξ^{next} ;
- ближайшее (возможно, измененное по сравнению со входным) время переключения switch_time.

Модуль реализован на C++. Псевдокод его основной части представлен в Листинге 1. Предполагается, что функции $\text{rnd_}\tau^E(\Gamma^E)$, $\text{rnd_}\tau^W(c, \Gamma^W, \nu)$ и $\text{rnd_}\xi(\sigma)$ генерируют реализации τ_k^E , τ_k^W и ξ_k по формулам (16) и (17).

Листинг 1. Псевдокод генерации значения шума ξ^{next} в момент t^{next} по известному значению ξ в момент t .

```

while switch_time ≤ t + h then
  if pulse then
    ξnext := 0
    switch_time := switch_time + rnd_τW(c, ΓW, ν)
    pulse := false
  else
    ξnext := rnd_ξ(σ)
    switch_time := switch_time + rnd_τE(ΓE)
    pulse := true
  end if
end do

```

Реализация переключений процесса в цикле связана с тем, что на малом отрезке $[t; t + h]$ возможны, хотя и маловероятны, несколько таких переключений, поскольку величины τ^E и τ^W теоретически могут принимать как угодно близкие к нулю значения. Однако понятно, что в подавляющем большинстве случаев данный цикл на каждом шаге решения по времени будет отрабатывать не более одного раза.

Модуль численного решения уравнений модели для экспоненциального ядра

Модуль реализован на C++ и предназначен для решения уравнений модели (7)–(10) для ядер подавления $K(t) = M_n t^n \exp(-t)$, $n = 0, 1, 2, \dots$, имеющих экспоненциальный порядок убывания на бесконечности. Здесь M_n – нормировочный коэффициент, определяемый условием $\max_{t \geq 0} K(t) = 1$. Такие ядра далее будем называть экспоненциальными (рис. 2).

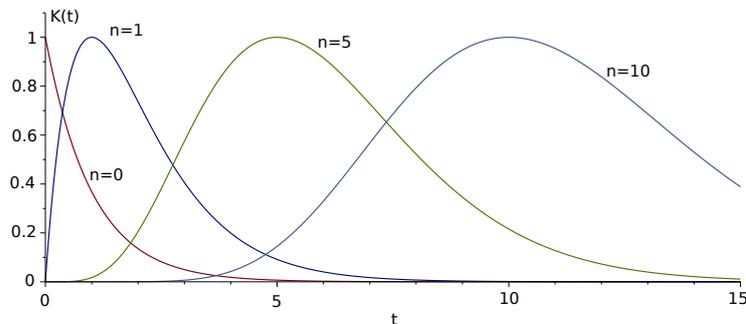


Рис. 2. Экспоненциальные ядра $K(t) = M_n t^n \exp(-t)$.
[Figure 2. Exponential kernels $K(t) = M_n t^n \exp(-t)$.]

Параметр n определяет задержку отклика α -эффекта на подавление. Действительно, при $n = 0$ отклик мгновенный, поскольку $K(0) = 1$ является наибольшим значением функции $K(t)$, и максимальный вклад в интеграл подавления в момент времени t дает значение энергии магнитного поля в этот же момент. Если $n \neq 0$, то $K(0) = 0$ и на подавление в момент t влияют только предшествующие значения энергии поля, т.е. имеет место задержка отклика. Эта задержка тем больше, чем больше n , поскольку максимум функции $K(t)$ достигается в точке $t = n$. Кроме того, чем больше n , тем ближе к нулю значения $K(t)$ в окрестности $t = 0$. Все эти рассуждения хорошо иллюстрируются рис. 2, на котором изображены функции $M_n t^n \exp(-t)$ для нескольких n .

Несложно показать, подобно работам [13, 15], что в случае ядер данного вида интегральное выражение (9), определяющее $u(t)$, оказывается равносильным следующей задаче Коши для функции $u(t)$:

$$\left(T_K \frac{d}{dt} + 1 \right)^{n+1} u(t) = n! \sum_{p=1}^{P_{\max}} \gamma_p^2(t), \quad u(0) = u'(0) = \dots = u^{(n)}(0) = 0. \quad (18)$$

Стандартным образом вводя переменные $u_m(t) = u^{(m)}(t)$, $m = 0, 1, \dots, n$, получаем тогда, что модель (7)–(9) с заданными начальными значениями для амплитуд полей (10) становится следующей задачей Коши для нормальной системы уравнений порядка $L_{\max} + S_{\max} + P_{\max} + n + 1$ со случайным возмущением $\xi(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{d\beta_l}{dt} &= \sum_{i,j=1}^{L_{\max}} B_{lij} \beta_i \beta_j - \mu_l \beta_l + E^{-1} \sum_{i=1}^{L_{\max}} E_{li} \beta_i + RaPr^{-1} \sum_{i=1}^{S_{\max}} C_{li} \alpha_i + \sum_{i,j=1}^{P_{\max}} Q_{lij} \gamma_i \gamma_j, \\ \beta_l(0) &= \beta_l^0, \quad l = 1, \dots, L_{\max}, \\ \frac{d\alpha_s}{dt} &= \sum_{i,j=1}^{L_{\max}, S_{\max}} F_{sij} \beta_i \alpha_j + \sum_{i=1}^{L_{\max}} H_{si} \beta_i - Pr^{-1} \lambda_s \alpha_s, \\ \alpha_s(0) &= \alpha_s^0, \quad s = 1, \dots, S_{\max}, \\ \frac{d\gamma_p}{dt} &= \sum_{i,j=1}^{L_{\max}, P_{\max}} W_{pij} \beta_i \gamma_j + \frac{R_\alpha (1 + \xi(t))}{1 + u_0} \sum_{i=1}^{P_{\max}} W_{pij}^\alpha \gamma_i - Pm^{-1} \eta_p \gamma_p, \\ \gamma_p(0) &= \gamma_p^0, \quad p = 1, \dots, P_{\max}, \\ \frac{du_m}{dt} &= u_{m+1}, \\ u_m(0) &= 0, \quad m = 0, \dots, n-1, \\ \frac{du_n}{dt} &= - \sum_{m=0}^n T_K^{m-n-1} C_{n+1}^m u_m + \frac{n!}{T_K^{n+1}} \sum_{p=1}^{P_{\max}} \gamma_p^2(t), \\ u_n(0) &= 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где C_{n+1}^m – биномиальные коэффициенты.

Модуль строит численное решение задачи Коши (19) с помощью схемы типа «предиктор–корректор» Адамса-Башфорта-Моултона 4-го порядка. Для краткости запишем эту задачу в следующем общем виде:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \xi(t), a), \quad x(0) = x^0, \quad (20)$$

где фазовый вектор x состоит из амплитуд $\alpha_s(t)$, $\beta_l(t)$, $\gamma_p(t)$ и переменных $u_m(t)$, а вектор параметров a включает в себя все параметры подобия, все параметры процесса $\xi(t)$ и параметры ядра, все коэффициенты Галеркина.

Пусть $f^k = f(x^k, \xi^k, a)$. Тогда реализованная в модуле разностная схема Адамса-Башфорта-Моултона 4-го порядка записывается в виде [14]:

$$\begin{aligned} x^{pr} &= x^n + \frac{h}{24} (55f^n - 59f^{n-1} + 37f^{n-2} - 9f^{n-3}), \\ x^{n+1} &= x^n + \frac{h}{24} (9f(x^{pr}, \xi^{n+1}, a) + 19f^n - 5f^{n-1} + f^{n-2}). \end{aligned} \quad (21)$$

Поскольку данная схема является 3-шаговой, необходимо до ее применения определить x^1 , x^2 и x^3 . Они вычисляются в модуле по стандартной явной схеме Рунге-Кутты 4-го порядка, причем начальное значение шума $\xi^0 = 0$.

На входе модуль получает следующие параметры из текстового файла:

- параметры L_{\max} , S_{\max} , P_{\max} , параметры подобия E , R_a , P_r , P_m , R_α ; ненулевые коэффициенты Галеркина (все прочие по умолчанию полагаются нулевыми);
- параметры ядра подавления T_k , n ;
- параметры T^E , T^W , ν , σ процесса $\xi(t)$;
- массивы начальных значений α_s^0 , β_l^0 , γ_p^0 ;
- общее время моделирования T_{\max} и шаг по времени h .

На выходе модуль формирует текстовый файл, каждая строка которого содержит:

- отсчет времени t_n ;
- отсчеты амплитуд мод скорости β_l^n , $l = 1, \dots, L_{\max}$;
- отсчеты амплитуд мод температуры α_s^n , $s = 1, \dots, S_{\max}$;
- отсчеты амплитуд магнитных мод γ_p^n , $p = 1, \dots, P_{\max}$;
- отсчет шума ξ^n ;
- отсчет интегрального члена u^n ;
- отсчет переменной интенсивности α -эффекта $R_\alpha (1 + \xi^n) / (1 + u^n)$.

Модуль численного решения уравнений модели для степенного ядра

Модуль реализован на C++ и предназначен для решения уравнений модели (7)-(9) с начальными значениями (10) при ядрах подавления

$$K(t) = \frac{M_{\rho,\psi} t^\rho}{(1+t)^{\rho+\psi}}, \quad \rho \geq 0, \psi > 0, \quad (22)$$

где $M_{\rho,\psi}$ – нормировочный коэффициент, определяемый условием $\max_{t \geq 0} K(t) = 1$. Ясно, что параметр ψ определяет порядок асимптотики ядра, поскольку $K(t) \sim 1/t^\psi$ при $t \rightarrow +\infty$. Параметр же ρ определяет задержку отклика α -эффекта на подавление. Это следует из рассуждений, полностью аналогичных рассуждениям о роли параметра n в экспоненциальных ядрах, а максимум функции $K(t)$ достигается в точке $t = \rho/\psi$. Иллюстрирующие примеры ядер приведены на рис. 3.

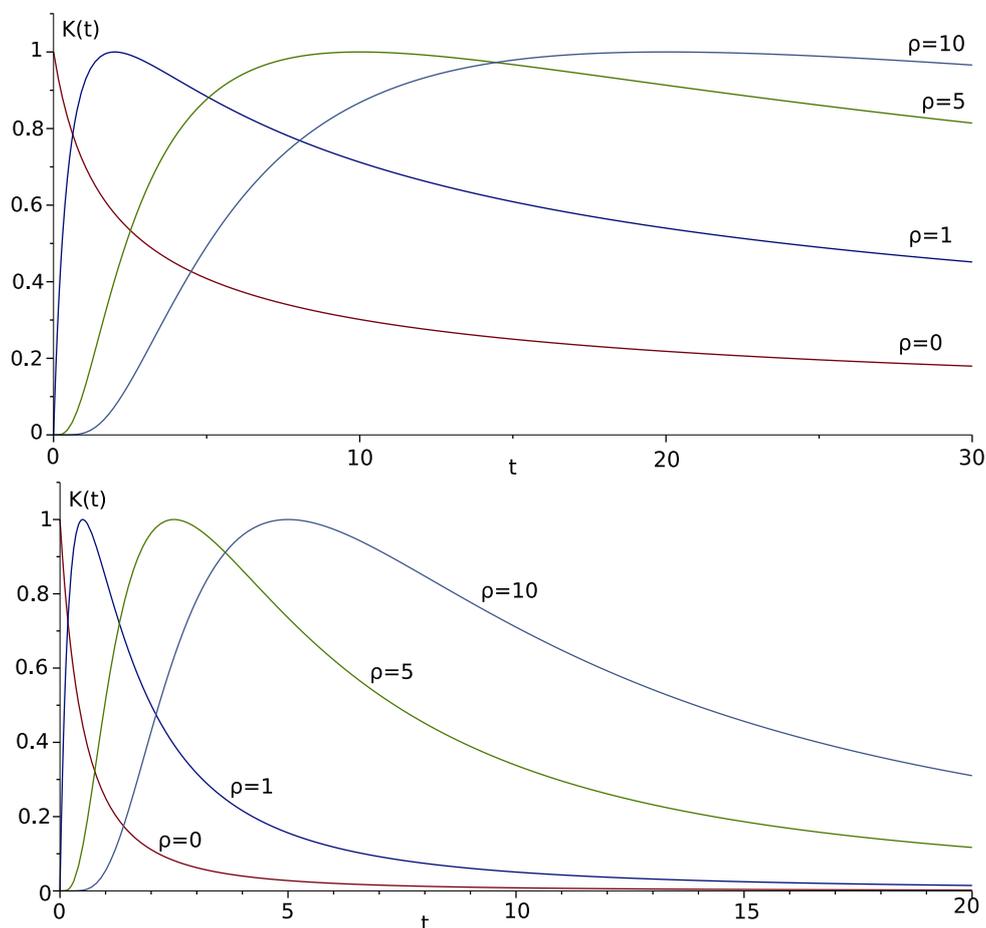


Рис. 3. Степенные ядра $K(t) = M_{\rho,\psi} t^\rho / (1+t)^{\rho+\psi}$: сверху $\psi = 0.5$, внизу $\psi = 2$.
 [Figure 3. Power kernels $K(t) = M_{\rho,\psi} t^\rho / (1+t)^{\rho+\psi}$: $\psi = 0.5$ top, $\psi = 2$ bottom.]

Для описания реализованной в модуле разностной схемы запишем уравнения (7)-(9) с условиями (10) в следующем общем виде

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, \xi(t), a), \quad u(t) = \int_0^t K\left(\frac{t-\tau}{T_K}\right) q(x(\tau), a) d\tau, \quad x(0) = x^0, \quad (23)$$

где фазовый вектор x состоит из амплитуд $\alpha_s(t)$, $\beta_l(t)$, $\gamma_p(t)$, а вектор параметров a включает в себя все управляющие параметры и коэффициенты Галеркина.

Модуль численно решает задачу (23) с помощью комбинированной схемы типа «предиктор–корректор». Для дифференциальной части задачи в основе схемы лежит метод Коши–Эйлера, а для интегральной – метод трапеций.

Отметим прежде всего, что для каждого момента времени t_n должны быть вычислены значения ядра $K\left(\frac{nh}{T_k}\right)$ и записаны в одномерный массив K^n . Размер массива определяется отношением времени моделирования к шагу h .

Начальное значение фазового вектора x^0 известно, начальные значения $u^0 = 0$, $q^0 = q(x^0, a)$, $\xi^0 = 0$.

Рассмотрим теперь основной расчетный этап — переход от момента t_n к моменту t_{n+1} . Будем считать, что для момента времени t_n известны x^n , ξ^n и u^n , а также записаны на всех предыдущих шагах вычислений элементы массива $q^k = q(x^k, a)$ для $k \leq n$.

Шаги этапа следующие:

1. Вычисляем по формуле трапеций интеграл $\int_0^{t_n} K\left(\frac{t_{n+1}-\tau}{T_k}\right) q(x(\tau), a) d\tau$:

$$I = \begin{cases} 0, & \text{если } n = 0; \\ \frac{h}{2} K^{n+1} q^0 + h \sum_{i=1}^{n-1} K^{n+1-i} q^i + \frac{h}{2} K^1 q^n, & \text{если } n \neq 0. \end{cases}$$

2. Вычисляем предикторы:

$$x^{pr} = x^n + hf(x^n, u^n, \xi^n, a), \quad z^{pr} = I + \frac{h}{2} K_1 q^n + \frac{h}{2} K_0 q(x^{pr}, a).$$

3. С помощью модуля генерации шума формируем $\xi^{n+1} = \xi^{next}$ по известному ξ^n .

4. Вычисляем корректоры:

$$\begin{aligned} x^{n+1} &= x^n + \frac{h}{2} [f(x^n, u^n, \xi^n, a) + f(x^{pr}, z^{pr}, \xi^{n+1}, a)], \\ q^{n+1} &= q(x^{n+1}, a), \\ u^{n+1} &= I + \frac{h}{2} [K^1 q^n + K^0 q^{n+1}]. \end{aligned}$$

5. Переходим к следующему этапу.

Видно, что формула для x^{pr} — это шаг явного метода Эйлера, а формула для z^{pr} представляет собой формулу трапеций для интеграла $\int_0^{t_{n+1}} K\left(\frac{t_{n+1}-\tau}{T_k}\right) q(x(\tau), a) d\tau$, где в последнем слагаемом вместо неизвестного x^{n+1} использован x^{pr} . Формула для x^{n+1} — это шаг неявного метода Эйлера с использованием предикторов вместо неизвестных величин. А формула для u^{n+1}

– это обычная формула трапеций для интеграла, выражающего $u(t_{n+1})$. Поэтому и получается, что используемая расчетная схема комбинирует метод Коши-Эйлера для дифференциальной части системы (23) и формулы трапеций для интегральной части этой системы.

На входе модуль получает следующие параметры из текстового файла:

- параметры L_{\max} , S_{\max} , P_{\max} , параметры подобия E , Ra ; Pr , Pm , $R\alpha$; ненулевые коэффициенты Галеркина (все прочие по умолчанию полагаются нулевыми);
- параметры ядра подавления T_K , ρ , ψ ;
- параметры T^E , T^W , ν , σ процесса $\xi(t)$;
- массивы начальных значений α_s^0 , β_l^0 , γ_p^0 ;
- общее время моделирования T_{\max} и шаг по времени h .

На выходе модуль формирует текстовый файл, структура которого полностью идентична структуре выходного файла предыдущего модуля.

Заключение

Авторами разработан комплекс программ для моделирования геодинамо в рамках класса спектральных моделей с эредитарным подавлением турбулентного генератора магнитного поля (α -эффекта).

В основе моделей лежат построения галеркинских аппроксимаций путем разложения полей задачи по собственным модам свободных затуханий. Поэтому первая группа задач, решаемых комплексом, — это расчет параметров базисных мод и расчет коэффициентов Галеркина. Эти задачи решаются двумя модулями комплекса за счет комбинированных численно-аналитических вычислений.

Моделирование эредитарного подавления можно выполнять по выбору пользователя ядрами подавления с экспоненциальной и степенной асимптотиками. Это обеспечивается двумя модулями численного решения на основе различных разностных схем.

Разработанный комплекс может быть полезен специалистам, изучающим задачу геодинамо на основе спектральных моделей и эффекты памяти в этой задаче.

Список литературы

1. Glatzmaier G. A., Roberts P. H. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal, *Nature*, 1995. vol. 377, pp. 203–209 DOI: 10.1038/377203a0.
2. Glatzmaier G. A., Roberts P. H. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1995. vol. 91, no. 1–3, pp. 63–75 DOI: 10.1016/0031-9201(95)03049-3.
3. Merrill R., McElhinny M., McFadden P. *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. New York: Acad. Press, 1996. 532 pp.
4. Гледзер Е. В., Должанский Ф. В., Обухов А. М. *Системы гидродинамического типа и их применение*. М.: Наука, 1981. 368 с.

5. Манин А. В. *Теоретические основы геофизической гидродинамики*. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 424 с.
6. Vodinchar G. M., Feshchenko L. K. Model of Geodynamo Driven by Six-jet Convection in the Earth's Core, *Magnetohydrodynamics*, 2016. vol. 52, no. 1, pp. 287–299.
7. Vodinchar G., Feshchenko L. Computational Technology for the Basis and Coefficients of Geodynamo Spectral Models in the Maple System, *Mathematics*, 2023. vol. 11, no. 13, pp. 3000 DOI: 10.3390/math11133000.
8. Krause F., Rädler K.-H. *Mean-field magnetohydrodynamics and dynamo theory*. Berlin: Academic-Verlag, 1980. 284 pp.
9. Zeldovich Ya. B., Ruzmaikin A. A., Sokoloff D. D. *Magnetic Fields in Astrophysics*. New York: Gordon and Breach, 1983. 365 pp.
10. Brandenburg A. Memory effects in turbulent transport, *Astrophysical Journal*, 2009. vol. 706, no. 1, pp. 712 DOI: 10.1088/0004-637X/706/1/712.
11. Тихонов А. Н., Самарский А. А. *Уравнения математической физики*. М.: Наука, 1972. 736 с.
12. L'Ecuyer P. Random Number Generation / *Handbook of Computational Statistics: Concepts and Methods*. Berlin–Heidelberg, Springer, 2012, pp. 35–72.
13. Vodinchar G., Feshchenko L. Fractal Properties of the Magnetic Polarity Scale in the Stochastic Hereditary $\alpha\omega$ -Dynamo Model, *Fractal and Fractional*, 2022. vol. 6, no. 6, pp. 328 DOI: 10.3390/fractalfract6060328.
14. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В. *Вычислительные методы для инженеров*. М.: Высшая школа, 1994. 544 с.
15. Водинчар Г. М., Казаков Е. А. Исключение интегрального члена в уравнениях одной эрдитарной системы, связанной с задачей гидромагнитного динамо, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2023. Т. 42, № 1, С. 180–190 DOI: 10.26117/2079-6641-2023-42-1-180-190.

Информация об авторах



Водинчар Глеб Михайлович ✉ – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Камчатский край, Россия,  ORCID 0000-0002-5516-1931.



Казаков Евгений Анатольевич ✉ – младший научный сотрудник, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Камчатский край, Россия,  ORCID 0000-0001-7235-4148.



Фещенко Любовь Константиновна ✉ – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Камчатский край, Россия,  ORCID 0000-0001-5970-7316.

References

- [1] Glatzmaier G. A., Roberts P. H. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal, *Nature*, 1995, vol. 377, pp. 203–209. DOI: 10.1038/377203a0
- [2] Glatzmaier G. A., Roberts P. H. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1995, vol. 91, no. 1–3, pp. 63–75. DOI: 10.1016/0031-9201(95)03049-3
- [3] Merrill R., McElhinny M., McFadden P. *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. New York, Acad. Press, 1996, 532 p.
- [4] Gledzer E. B., et. al. *Sistemy gidrodinamicheskogo tipa i ih primeneniye* [Hydrodynamic type systems and their application]. Moscow, Nauka, 1981, 368 p. (In Russian).
- [5] Moinin A. B. *Teoreticheskie osnovy geofizicheskoy gidrodinamiki* [Theoretical foundations of geophysical fluid dynamics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988, 424 p. (In Russian).
- [6] Vodinchar G. M., Feshchenko L. K. Model of Geodynamo Driven by Six-jet Convection in the Earth's Core, *Magnetohydrodynamics*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 287–299.
- [7] Vodinchar G., Feshchenko L. Computational Technology for the Basis and Coefficients of Geodynamo Spectral Models in the Maple System, *Mathematics*, 2023, vol. 11, no. 13, 3000.
- [8] Krause F., Rädler K.-H. *Mean-field magnetohydrodynamics and dynamo theory*. Berlin, Academic-Verlag, 1980, 284 p.
- [9] Zeldovich Ya. B., Ruzmaikin A. A., Sokoloff D. D. *Magnetic Fields in Astrophysics*. New York, Gordon and Breach, 1983, 365 p.
- [10] Brandenburg A. Memory effects in turbulent transport, *Astr. Jour.*, 2009, 706: 1, 712.
- [11] Tihonov A. N., Samarskii A. A. *Equations of Mathematical Physics*. New York, Dover Publications, 2013, 800 p.
- [12] L'Ecuyer P. Random Number Generation. In: *Handbook of Computational Statistics: Concepts and Methods*. Berlin–Heidelberg, Springer, 2012, pp. 35-72-112
- [13] Vodinchar G., Feshchenko L. Fractal Properties of the Magnetic Polarity Scale in the Stochastic Hereditary $\alpha\omega$ -Dynamo Model, *Fractal Fract*, 2022, vol. 6, no. 6, 328.
- [14] Amosov A. A., et. al. *Vychislitel'nye metody dlya inzhenerov* [Computational Methods for Engineers]. Moscow, Vysshaya shkola, 1994, 544 p. (In Russian).
- [15] Vodinchar G. M., Kazakov E. A. Elimination of the integral term in the equations of one hereditary system related to the problem of hydromagnetic dynamo, *Vest. KRAUNC. Fiz.-Mat. Nauki*, 2023, 42:1, 180–190. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-42-1-180-190 (In Russian).

Information about the authors



Vodinchar Gleb Mikhailovich ✉ – PhD (Phys & Math), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Kamchatka, Russia, ORCID 0000-0001-7235-4148.



Kazakov Evgeny Anatolyevich ✉ – Junior Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Kamchatka, Russia, ORCID 0000-0001-7235-4148.



Feshchenko Liybov Konstantinovna ✉ – PhD (Phys & Math), Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Kamchatka, Russia, ORCID 0000-0001-5970-7316.



Численная схема для одной интегро-дифференциальной системы, связанной с задачей космического динамо

*Е. А. Казаков**

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, с. Паратунка, Елизовский район, Камчатский край, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена описанию разработанной численной схемы для моделирования эредитарной динамической системой, являющейся моделью двумодового гидромагнитного динамо. Модели включают в себя два генератора магнитного поля — крупномасштабный и турбулентный (α -эффект). Влияние магнитного поля на движения среды представлено через подавление α -эффекта функционалом от компонент поля, что вводит в модель память (эредитарность). Модель описывается интегро-дифференциальной системой уравнений. В работе представлена сама численная схема и исследован порядок точности на вложенных сетках. Численная схема состоит из двух частей, для дифференциальной части используется метод трапеций, а для интегральной квадратурная формула трапеций. В результате сопряжения схем получаем нелинейную алгебраическую систему уравнений. Для решения такой системы необходимо привлечение методов для нелинейных алгебраических систем. В работе был выбран метод Ньютона. Показано, что в случае экспоненциального ядра функционала подавления модель может быть сведена к классической системе Лоренца. Известный характер динамики системы Лоренца при различных параметрах позволил верифицировать численную схему. Показано, что численная схема позволяет решать на качественном уровне интегро-дифференциальную систему уравнений, которая является моделью космического динамо. Данная численная схема была разработана для конкретной модели, но может быть легко обобщена для других квадратично-нелинейных интегро-дифференциальных систем.

Ключевые слова: гидромагнитное динамо, системы с памятью, эредитарность, интегро-дифференциальные уравнения, численная схема, векторное уравнение Вольтерра.

Получение: XX.11.2024; Исправление: XX.11.2024; Принятие: XX.11.2024; Публикация онлайн: XX.11.2024

Для цитирования. Казаков Е. А. Численная схема для одной интегро-дифференциальной системы, связанной с задачей космического динамо // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 54-68. EDN: WIIDTB. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-54-68>.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 22-11-00064 по теме «Моделирование динамических процессов в геосферах с учетом наследственности».

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция:  E-mail: Kazakov@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License



© Казаков Е. А., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



Numerical Scheme for one Integro-Differential System Related to the Problem of Space Dynamo

*E. A. Kazakov**

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS,
684034, Paratunka, Mirnaya srt.,7, Russia

Abstract. The article is devoted to the description of the developed numerical scheme for modeling a hereditary dynamic system, which is a model of a two-mode hydromagnetic dynamo. The models include two magnetic field generators - large-scale and turbulent (α -effect). The influence of the magnetic field on the motion of the medium is presented through the suppression of the α -effect by the functional of the field components, which introduces memory into the model (hereditary). The model is described by an integro-differential system of equations. The paper presents the numerical scheme itself and investigates the order of accuracy on nested grids. The numerical scheme consists of two parts, the trapezoid method is used for the differential part, and the trapezoid quadrature formula is used for the integral part. As a result of conjugation of the schemes, we obtain a nonlinear algebraic system of equations. To solve such a system, it is necessary to involve methods for nonlinear algebraic systems. In this paper, the Newton method was chosen. It is shown that in the case of an exponential kernel of the suppression functional, the model can be reduced to the classical Lorenz system. The known nature of the dynamics of the Lorenz system for various parameters allowed us to verify the numerical scheme. It is shown that the numerical scheme allows us to qualitatively solve the integro-differential system of equations, which is a model of a cosmic dynamo. This numerical scheme was developed for a specific model, but can be easily generalized for other quadratic-nonlinear integro-differential systems.

Key words: hydromagnetic dynamo, systems with memory, heredity, integro-differential equations, numerical scheme, Volterra vector equation.

Received: XX.11.2024; Revised: XX.11.2024; Accepted: XX.11.2024; First online: XX.11.2024

For citation. Kazakov E. A. Numerical scheme for one integro-differential system related to the problem of space dynamo. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 54-68. EDN: WIIDTB. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-54-68>.

Funding. The work is supported by Russian Science Foundation, grant No. 22-11-00064, <https://rscf.ru/project/22-11-00064>.

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. Author is solely responsible for providing the final version of the article in print.

*Correspondence:  E-mail: Kazakov@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Kazakov E. A., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Для развития теории космических динамо-систем актуальным направлением работ является разработка и исследование малоразмерных динамических систем с памятью, моделирующих на феноменологическом уровне процесс генерации магнитных полей. По сложившейся в теории динамических систем терминологии, модели с памятью называют эредитарными.

Феноменологически эредитарная модель космического динамо может быть представлена в интегро-дифференциальном виде [1, 2]:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -\mu x + (\mu - \phi \int_0^t K(t-\tau)Q(x(\tau), y(\tau))d\tau.)y, \\ \frac{dy}{dt} &= (D - \int_0^t K(t-\tau)Q(x(\tau), y(\tau))d\tau.)x - y.\end{aligned}\tag{1}$$

В работе будем использовать компактную форму записи системы (1), которая имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= (\eta - ps^2z)y - \eta x, \\ \frac{dy}{dt} &= (D - z)x - y, \\ z &= \int_0^t K(t-\tau)Q(x(\tau), y(\tau))d\tau.\end{aligned}\tag{2}$$

Формально, любая интегро-дифференциальная система может быть в эквивалентном виде представлена в чистой интегральной системы Вольтерра, но имеющая специфическую структуру [3]. Поэтому использовать общие методы для систем нелинейных систем Вольтерра нецелесообразно, ввиду большой громоздкости расчетов, более разумным является разработка метода исследования изначально адаптированную под изучаемую модель.

Рассмотрим задачу Коши для дифференциального уравнения

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), t), \quad x(0) = a.$$

Любое такое дифференциальное уравнение может быть записано в эквивалентном виде

$$x(t) = a + \int_0^t f(\tau, x(\tau))d\tau.$$

Такая конструкция представляет из себя, как говорилось ранее, частный случай интегрального уравнения Вольтерра [4–6]. В общем виде интегрального уравнения Вольтерра предполагается, что подынтегральная функция f зависит не только от τ но и от t . Если функция f зависит только от τ , то можно свести такое интегральное уравнение к дифференциальному уравнению. Если же функция f явно зависит не только от τ , но и от t , то вообще говоря, не факт, что можно свести интегральное уравнение к дифференциальному уравнению или системе дифференциальных уравнений.

Рассмотрим на примере нашей систем (2). Перепишем уравнения системы в интегральную форму:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial t} \\ \frac{\partial y}{\partial t} \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(0) \\ y(0) \\ 0 \end{pmatrix} + \int_0^t \begin{pmatrix} (\eta^T - \phi z) y - \eta^T x, \\ (D - z)x - y \\ K(t - \tau)Q(x(\tau)y(\tau)) \end{pmatrix} dt. \quad (3)$$

Численно решить такую систему используя стандартные методы будет достаточно проблематично, из-за того, что численные методы которые используя в математических пакетах являются универсальными и обрабатывают колоссальный объем данных. В связи с этим была решена задача разработка численного метода для решения конкретной задачи вида (1).

Разностные схемы

Для начала в системе (2) введем следующие замены:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \mu \\ \phi \\ D \end{bmatrix} - \text{вектор параметров.}$$

И перепишем систему в векторном виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}}{dt} &= f(\mathbf{x}, z, \mathbf{a}), \\ z &= \int_0^t K(t - \tau)Q(\mathbf{x}(\tau)) d\tau. \end{aligned} \quad (4)$$

Вводим временную сетку T с шагом Δt , ведем расчет для t_k равно отстоящих. Через $\mathbf{x}[k]$ и $z[k]$ обозначаем значения функции в эти самые моменты времени:

$$\begin{aligned} t_k &= k\Delta t, \\ \mathbf{x}[k] &= \mathbf{x}(t_k), \\ z[k] &= z(t_k). \end{aligned}$$

Для численного исследования модели необходимо совмещение разностных схем для дифференциальной части и квадратурной формы для интегральной части.

В качестве разностной схемы для дифференциальной части возьмем метод трапеции [7–9].

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[k + 1] &= \mathbf{x}[k] + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{m}_1 + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{m}_2, \\ \mathbf{m}_1 &= f(\mathbf{x}[k], z[k], \mathbf{a}), \\ \mathbf{m}_2 &= f(\mathbf{x}[k] + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{m}_1 + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{m}_2, z[k + 1], \mathbf{a}). \end{aligned} \quad (5)$$

В расчетных целях его удобнее записать в следующем виде:

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{x}[k] + \frac{\Delta t}{2} (f(\mathbf{x}[k], \mathbf{z}[k], \mathbf{a}) + f(\mathbf{x}[k+1], \mathbf{z}[k+1], \mathbf{a})). \quad (6)$$

В качестве квадратурной формы для интегрального члена – квадратурная формула трапеции [3, 11]:

$$z[k+1] = \frac{h}{2} \hat{K}[k+1] Q(\mathbf{x}[0]) + h \sum_{i=1}^k \hat{K}[\Delta t(k-i)] Q(\mathbf{x}[i]) + \frac{h}{2} \hat{K}[0] Q(\mathbf{x}[k+1]). \quad (7)$$

Расчет состояния системы в $k+1$ момент времени сводиться к тому, что из данной системы уравнений мы должны найти чему равняется $\mathbf{x}[k+1]$ и $\mathbf{z}[k+1]$. В тоже самое время хорошо видно, что переменные $\mathbf{x}[k+1]$ и $\mathbf{z}[k+1]$ фигурируют в правых частях равенства. Таким образом имеет дело не с явными формулами рекуррентного типа, которые позволяют легко и просто просчитывать значения, а с неявными уравнениями решение данной системы уравнений, размерность которой определяется размерностью фазового пространства данной системы и позволит рассчитать состояние системы в следующий шаг. Конечно расчет по явным схемам имеет большие преимущества с точки зрения быстродействия, однако хорошо известно, что неявные схемы имеют меньшие ограничения по выбору шага, с точки зрения устойчивости. Поскольку в изучаемых моделях можно ожидать появление хаотических режимов, очень чувствительных к расчетным ошибкам предпочтение было отдано неявным схемам. Поэтому полученную систему нелинейных уравнений относительно $\mathbf{x}[k+1], \mathbf{y}[k+1]$ будем решать с помощью метода Ньютона [6, 10].

Метод Ньютона для систем:

$$\mathbf{X}[n+1] = \mathbf{X}[n] - W^{-1}(\mathbf{X})F(\mathbf{X}), \quad (8)$$

где $W(\mathbf{X})$ – Якобиан матрицы $F(\mathbf{X})$.

Для начала к системе, к дифференциальной части, применим метод, получим уравнения:

$$\begin{aligned} x[n+1] &= x[n] + \\ &+ \frac{h}{2} (-\eta x[n] + (\eta - \phi z[n])y[n] + \eta x[n+1] + (\eta - \phi z[n+1])y[n+1]), \\ y[n+1] &= y[n] + \frac{h}{2} ((D - z[n])x[n] - y[n] + (D - z[n+1])x[n+1] - y[n+1]). \end{aligned} \quad (9)$$

Теперь в каждое уравнение вместо $z[n+1]$ подставим

$$z[n+1] = \frac{h}{2} K[0] (q_{11}x^2[n+1] + 2q_{12}x[n+1]y[n+1] + q_{22}y^2[n+1]) + L[n],$$

где q_{11}, q_{22} – коэффициенты при функции подавления энергией q_{12} – коэффициент при функции подавления спиральностью, $K[0]$ – ядро функционала подавления.

$$L[n] = K[n]Q(x[0], y[0]) + \sum_{k=1}^n K[n+1-k]Q(x[k]y[k]),$$

$Q(x, y) = q_{11}x^2[n+1] + 2q_{12}x[n+1]y[n+1] + q_{22}y^2[n+1]$ – квадратичная форма функции подавления (общий вид).

$$\begin{aligned} x[n+1] &= x[n] + \frac{h}{2}(-\eta x[n] + (\eta - \phi z[n])y[n] - \eta x[n+1] + \\ &+ (\eta - \phi)\frac{h}{2}K[0](q_{11}x^2[n+1] + 2q_{12}x[n+1]y[n+1] + q_{22}y^2[n+1]) + L[n])y[n+1]), \\ y[n+1] &= y[n] + \frac{h}{2}((D - z[n])x[n] - y[n] + \\ &+ (D - \frac{h}{2}K[0](q_{11}x^2[n+1] + 2q_{12}x[n+1]y[n+1] + q_{22}y^2[n+1])) + \\ &+ L[n])x[n+1] - y[n+1]). \end{aligned} \tag{10}$$

Мы получили систему нелинейных алгебраических уравнений неизвестными в которой являются $x[n+1]$ и $y[n+1]$.

Перенесем левую часть уравнения в правую.

$$\begin{aligned} F_1 &= -x[n+1] + x[n] + \frac{h}{2}(-\eta x[n] + (\eta - \phi z[n])y[n] - \eta x[n+1] + \\ &+ (\eta - \phi)\frac{h}{2}K[0](q_{11}x^2[n+1] + 2q_{12}x[n+1]y[n+1] + q_{22}y^2[n+1]) + L[n])y[n+1]), \\ F_2 &= -y[n+1] + y[n] + \frac{h}{2}((D - z[n])x[n] - y[n] + \\ &(D - \frac{h}{2}K[0](q_{11}x^2[n+1] + 2q_{12}x[n+1]y[n+1] + q_{22}y^2[n+1])) + \\ &+ L[n])x[n+1] - y[n+1]). \end{aligned} \tag{11}$$

Теперь вычислим Якобианы системы по следующей формуле:

$$W = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x[n+1]} & \frac{\partial F_1}{\partial y[n+1]} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x[n+1]} & \frac{\partial F_2}{\partial y[n+1]} \end{vmatrix}. \tag{12}$$

Получим:

$$W_{11} = -\frac{1}{2}\phi h^2 K[0]q_{11}x[n+1]y[n+1] - \frac{1}{2}\phi h^2 K[0]q_{11}y^2[n+1] - 1 - \frac{1}{2}\eta h,$$

$$\begin{aligned} W_{12} &= -\frac{1}{4}\phi h^2 K[0]q_{11}x[n+1]^2 - \phi h^2 K[0]q_{12}x[n+1]y[n+1] - \\ &-\frac{3}{4}\phi h^2 K[0]q_{22}y^2[n+1] + \frac{1}{2}h(\eta - \phi L[n]), \end{aligned}$$

$$W_{12} = W_{21} = -\frac{3}{4}h^2K[0]q_{11}x^2[n+1] - h^2K[0]q_{12}x[n+1]y[n+1] - \\ -\frac{1}{4}h^2K[0]q_{22}y^2[n+1] + \frac{1}{2}h(D - L[n]),$$

$$W_{22} = -\frac{1}{2}h^2K[0]q_{12}x^2[n+1] - \frac{1}{2}h^2K[0]q_{22}x[n+1]y[n+1] - 1 - \frac{1}{2}h.$$

Алгоритм решения:

1. Зададим начальные условия $x[0] = y[0]$.
2. На текущий момент времени t (шаг i) пусть будут известны значения $x[i], y[i]$.
3. Вычисляем функции $L[n]$ и $z[n]$.
4. Вычисляем Якобиан системы W .
5. находим обратную матрицу к нашему Якобиану W^{-1} .
6. Считаем значение функции F_1 и F_2 (11) в текущий момент времени.
7. По формуле метода Ньютона (8) считаем $i + 1$ значения для x и y .
8. Увеличим временной индекс t на значение h (шаг i на 1) и переходим на шаг алгоритма 2.

Сопоставление с динамикой известной системы

Интегральный член является признаком эрмитности модели (2). В то же время его можно исключить для некоторых типов ядер с экспоненциальной асимптотикой за счет расширения размерности фазового пространства модели. Точнее говоря, если ядро является решением линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами, то система (2) равносильна некоторой дифференциальной системе, с начальными условиями на дополнительные фазовые переменные. А именно справедлива теорема [12]:

ТЕОРЕМА. Если ядро $K(t)$ является решением дифференциального уравнения

$$a_0K^{(n)}(t) + a_1K^{(n-1)}(t) + \dots + a_{n-1}K'(t) + a_nK(t) = 0 \quad (13)$$

с постоянными коэффициентами a_i , то интегральное равенство

$$z(t) = \int_0^t K(t-\tau)Q(x(\tau), y(\tau)) d\tau.$$

равносильно следующей задаче Коши для функции $z(t)$:

$$a_0 \frac{d^n z}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} z}{dt^{n-1}} + \dots + a_n z = \sum_{l=1}^n a_{n-l} \sum_{s=0}^{l-1} K^{(s)}(0) \frac{d^{l-1-s}}{dt^{l-1-s}} Q(x(t), y(t)),$$

$$z(0) = 0, \tag{14}$$

$$\left. \frac{d^l z(t)}{dt^l} \right|_{t=0} = \sum_{s=0}^{l-1} K^{(s)}(0) \left. \frac{d^{l-1-s}}{dt^{l-1-s}} Q(x(t), y(t)) \right|_{t=0}, \quad l = 1, \dots, n-1.$$

Рассмотрим процесс верификации на нашей системе (2), в возьмем в качестве параметров следующие $\phi = 0$, $Q(x(\tau)y(\tau)) = xy$, $K(t - \tau) = e^{-bt}$, $\eta^T = 10$ и $b = 8/3$. Воспользуемся условием теоремы об исключении интегрально члена из системы (2), получим систему вида:

Получим систему вида:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (y - x) \eta^T, \\ \frac{dy}{dt} &= (D - z)x - y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz, \\ z(0) &= 0. \end{aligned} \tag{15}$$

Эта система $\alpha\omega$ -динамо, соответствующая системе Лоренца. Динамика такой системы прекрасно известна [13].

Будем варьировать параметр D и будем получать различные режимы системы. Для $D = 20$ получим асимптотически устойчивый режим рис. 1,2.

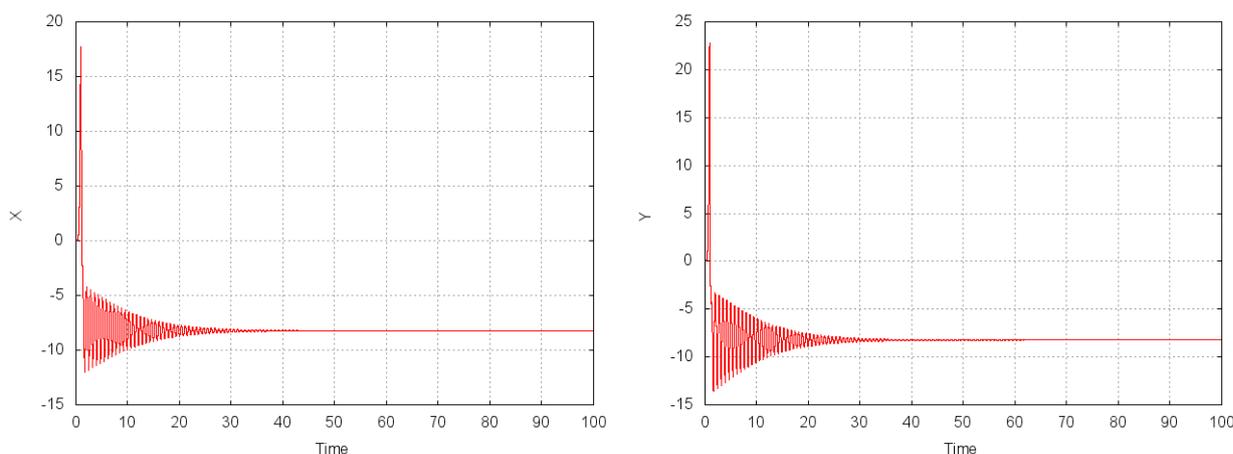


Рис. 1. Фазовая координаты: (а) X при $D = 20$; (б) Y при $D = 20$.
[Figure 1. Phase coordinates: (a) X at $D = 20$; (b) Y for $D = 20$.]

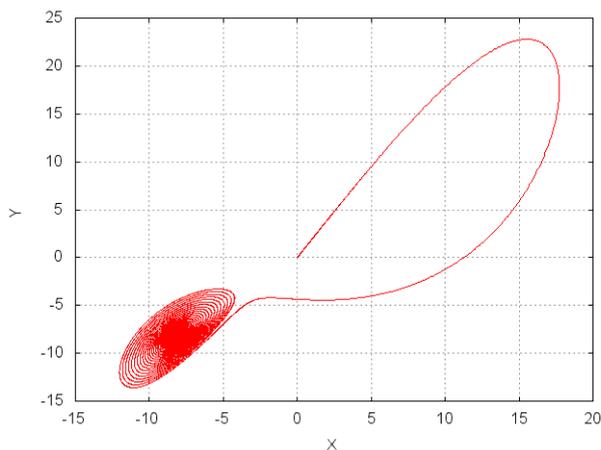


Рис. 2. Фазовый портрет системы при $D = 20$.
 [Figure 2. Phase portrait of the system at $D = 20$.]

$D = 220$ получим периодический режим рис. 3,4.

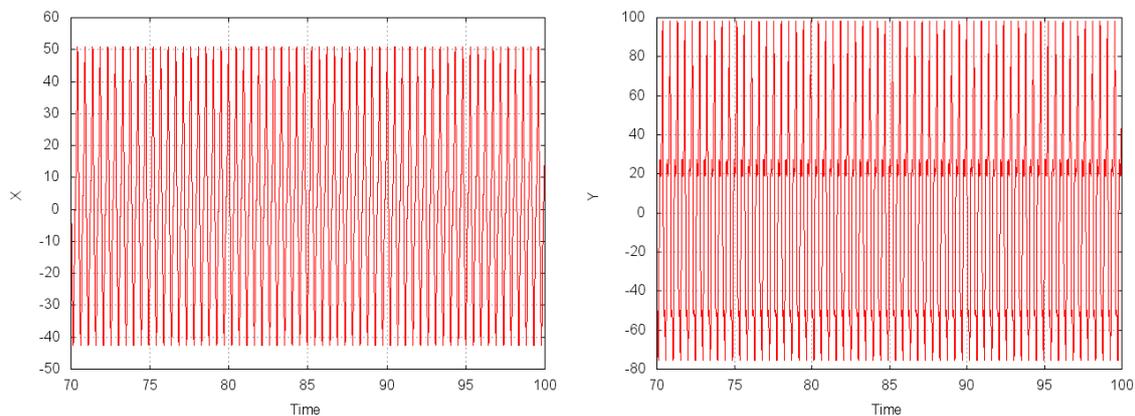


Рис. 3. Фазовая координаты: (а) X при $D = 220$; (б) Y при $D = 220$.
 [Figure 3. Phase coordinates: (a) X at $D = 220$; (b) Y for $D = 220$.]

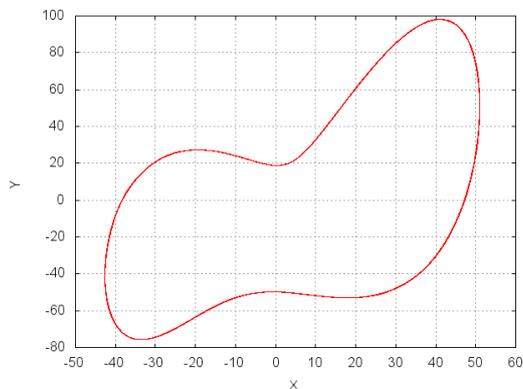


Рис. 4. Фазовый портрет системы при $D = 220$.
 [Figure 4. Phase portrait of the system at $D = 220$.]

Если же $D = 28$ получим хаотический режим рис. 5,6.

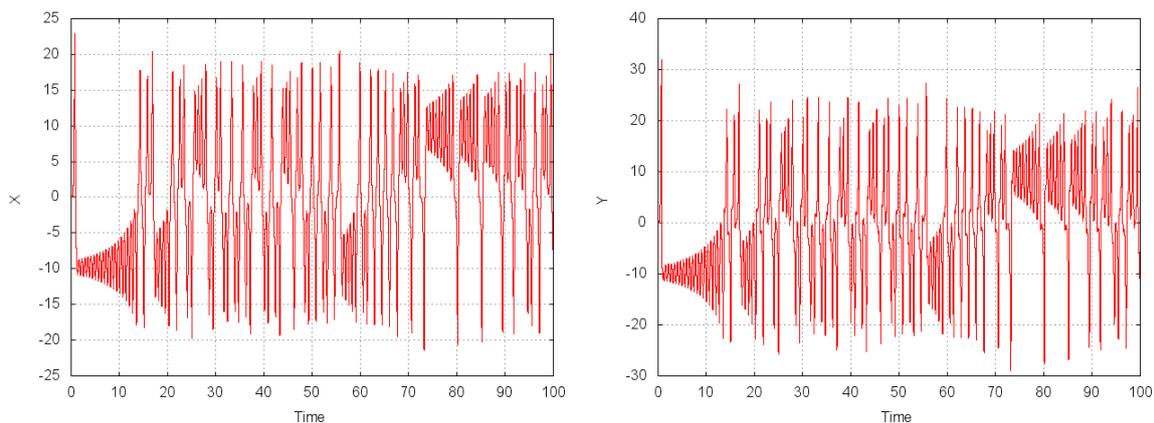


Рис. 5. Фазовая координаты: (а) X при $D = 28$; (б) Y при $D = 28$.
[Figure 5. Phase coordinates: (a) X at $D = 28$; (b) Y for $D = 28$.]

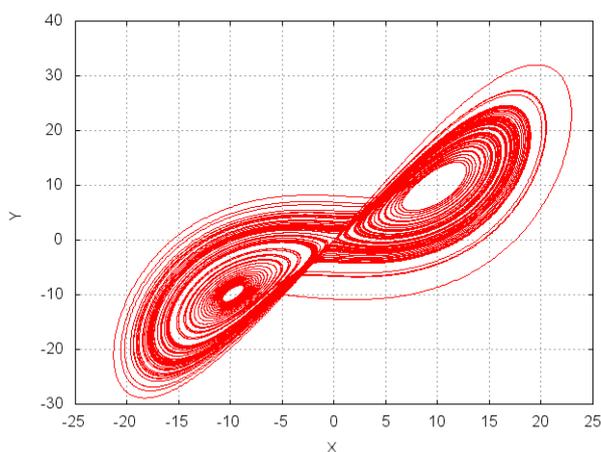


Рис. 6. Фазовый портрет системы при $D = 28$.
[Figure 6. Phase portrait of the system at $D = 28$.]

Порядок точности численной схемы

При использовании любой приближенной схемы важно иметь представление о её точности. Часто, в ходе работы бывает целесообразно изменять шаг сетки по ходу расчета, контролируя, тем самым погрешность на шаге.

Погрешность в результате вычислений может возникнуть по следующим причинам:

1. погрешность при моделировании, любое разностное уравнение не является абсолютным эквивалентом дифференциальному уравнению, это основной источник погрешности.

2. округление чисел при вычислении.
3. погрешность в значениях правой части $f(x, y)$, погрешность вызвана тем фактом, что рассматривается некоторое приближение функции к правой части дифференциального уравнения. Так же в ходи вычисления на ЭВМ функция $f(x, y)$ может быть приближена другими функциями, что в свою очередь вносит дополнительную погрешность в решение уравнения.
4. y_{i+1} определяется и уравнения которое эквивалентно исходному, но не может быть разрешимо в явном виде.

Исследование порядка точности по правилу Рунге заключается в следующем: берется решение на сетки h и сравнивается с решением на сетке с шагом в 2 раза меньше т.е. $h/2$. И в дальнейшем рассмотрении разностей погрешностей для этих двух вычислений по формуле [14, 15]:

$$\epsilon = \frac{|y_h - y_{h/2}|}{2^p - 1} \quad (16)$$

Формула Рунге справедлива для всех вычислительных процессов, для которых выполняется степенной закон. Для определения порядка метода p необходимо проведение априорной оценки погрешности, что не всегда легко осуществить [16]

Английский математик Эйткен предложил способ оценки погрешности для случая, когда порядок метода неизвестен. Более того, алгоритм Эйткена позволяет опытным путем определить и порядок метода. Для этого необходимо третий раз вычислить значение величины y с шагом $h/4$ [17].

Для удобства введем переменную k , которая в данном случае равна $\frac{1}{2}$. Для вычисление порядка p используем формулу Эйткена:

$$k^p = \frac{y_{kh} - y_{k^2h}}{y_h - y_{kh}} \quad (17)$$

Из формулы (17) получаем следующее соотношение:

$$p = \frac{\log W}{\log k}, \quad (18)$$

где $W = \frac{y_{kh} - y_{k^2h}}{y_h - y_{kh}}$.

Были проведены численные эксперименты при шагах h , $h/2$, $h/4$, $h/8$, $h/16$, $h/32$. Управляющие параметры исследуемой системы (2) были выбраны следующие:

$$\eta^T = 10 \quad D = 15 \quad b = \frac{8}{3} \quad K(t - \tau) = e^{-bt} \quad Q(x, y) = xy.$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Для выбранного вычислительного процесса алгоритм Эйткена достаточно применить только один раз определения порядка метода, а затем использовать формулу Рунге, требующую только двукратного вычисления искомой величины.

Таблица 1

Расчет порядка точности по формуле Эйткена [Calculation of the order of accuracy using the Aitken formula]

$h = 0.001$	W	$\log W$	p
$h/4$	0.4994309359	-0.6942859569	1.001642907
$h/8$	0.5003558056	-0.6924358225	0.9989737273
$h/16$	0.5001269831	-0.6928932467	0.9996336509
$h/32$	0.5000846339	-0.6929779271	0.9997558189

Априорный и апостериорный порядки должны получаться совпадающими для численных схем. Конечно, это совпадение будет приближенным, так как при получении алгоритмов Рунге и Эйткена учитывались только главные члены погрешности.

Таким образом можно утверждать, что разностная схема имеет глобальный 1 порядок точности. О локальном порядке (порядок точности на шаге) для интегро-дифференциальной системы говорить бессмысленно.

Заключение

Предложенная численная схема позволяет проводить моделирование интегро-дифференциальных систем являющимися моделями гидромагнитного динамо. Поскольку исследуемая система является интегро-дифференциальной необходимо было совместить разностные схемы для дифференциальной части и квадратурной формы для интегральной части. В качестве разностной схемы для дифференциальной части был взят метод трапеции. А в качестве квадратурной формы для интегрального члена квадратурная формула трапеций.

Исследования порядка точности предложенной численной схемы проводилось при помощи метода Эйткена. Полученный порядок равен 1.

В целом, численный метод может быть применен, с незначительными изменениями, для исследования широкого класса задач связанных с системами интегро-дифференциальных уравнений.

Список литературы

1. Vodinchar G. Hereditary Oscillator Associated with the Model of a Large-Scale $\alpha\omega$ -Dynamo, *Mathematics*, 2020. vol. 8(11), pp. 2065 DOI: 10.3390/math8112065.
2. Казаков Е. А. Эредитарная маломодовая модель динамо, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.*, 2021. Т. 35(2), С. 40-47 DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-40-47.
3. Васильева А. Б., Тихонов Н. А. *Интегральные уравнения*. М.: Физматлит, 2002.
4. Бандурин Н. Г. Численное решение существенно нелинейных интегро-дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, *Вычислительные технологии*, 2010. Т. 15(3), С. 31–38.
5. Забрейко П. П., Кошелев А. И., Красносельский М. А. *Интегральные уравнения*. М.: Наука, 1968.
6. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В.. *Численные методы для инженеров*. М.: Высшая школа, 1994.

7. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М.: Наука, 1968.
8. Калиткин Н. Н. *Численные методы*. М.: Наука, 1978.
9. Эльсгольц Л. Э. *Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление*. М.: Наука, 1969.
10. Griffiths D. V., Smith I. M. *Numerical methods for engineers*. Chapman and Hall: CRC, 2006.
11. Moheuddin M.M., Titu M.A.S., Hossai S.A New Analysis of Approximate Solutions for Numerical Integration Problems with Quadrature-based Methods, *Pure and Applied Mathematics Journal*, 2020. vol. 9, no. 3, pp. 46-54 DOI: 0.11648/j.pamj.20200903.11.
12. Водинчар Г. М., Казаков Е.А. Исключение интегрального члена в уравнениях одной эредитарной системы, связанной с задачей гидромагнитного динамо, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.*, 2023. Т. 42(1), С. 180-190 DOI: doi.org/10.26117/2079-6641-2023-42-1-180-190.
13. Vodinchar G., Kazakov E. The Lorenz system and its generalizations as dynamo models with memory, *E3S Web of Conf*, 2018. vol. 62 DOI: 10.1051/e3sconf/20186202011.
14. Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З. *Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения*. М.: Наука, 1967.
15. Деккер К., Вервер Я. *Устойчивость методов Рунге-Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений*. М.: Мир, 1988.
16. Хашин С. И. Оценка погрешности классических методов Рунге-Кутты, *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.*, 2014. Т. 54, № 5, С. 746-754.
17. Gautschi W. *Numerical analysis*. Springer: Science & Business Media, 2011.

Информация об авторе



Казаков Евгений Анатольевич✉ – младший научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0001-7235-4148.

References

- [1] Vodinchar G. M. Hereditary Oscillator Associated with the Model of a Large-Scale $\alpha\omega$ -Dynamo. *Mathematics*, 2020, vol. 8, no. 11, p. 2065. DOI: 10.3390/math8112065
- [2] Kazakov E. A. Hereditary low-mode dynamo model. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, 35: 2, 40-47. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-40-47 (In Russian).
- [3] Vasilyeva A. B., Tikhonov N. A. *Integralnie uravneniay [Integral equations]* Moscow. Fizmatlit, 2002. (In Russian).
- [4] Bandurin N. G. Numerical solution of essentially nonlinear integro-differential problems equations with a retarded argument. *Computational technologies*, 2010. vol 15, no 3, pp 31–38. (In Russian).
- [5] Zabreiko P. P., Koshelev A. I., Krasnoselsky M. A. *Integralnie uravneniay [Integral equations]* Moscow. Nauka, 1968. (In Russian)
- [6] Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlay nauchnih rabotnikov i ingenerov [Handbook of mathematics for scientists and engineers]*. Moscow. Nauka, 1968. (In Russian).
- [7] Amosov A. A., Dubinsky Yu. A., Kopchenova N. V. *Chislennyye metody dlya inzhenerov [Numerical methods for engineers.]* Moscow. Higher School, 1994. (In Russian)
- [8] Kalitkin N. N. *Numerical methods*. Moscow. Nauka. 1978. 512. (In Russian).
- [9] Elsgolts L. E. *Differencialnie uravneniay i variacionnoe vichislenie [Differential equations and calculus of variations]*. Moscow. Nauka, 1969. (In Russian)
- [10] Griffiths D. V., Smith I. M. *Numerical methods for engineers*. Chapman and Hall: CRC, 2006.
- [11] Moheuddin M.M., Titu M.A.S., Hossain S. A New Analysis of Approximate Solutions for Numerical Integration Problems with Quadrature-based Methods. *Pure and Applied Mathematics Journal*. vol. 9, no. 3, 2020, pp. 46-54. DOI: 10.11648/j.pamj.20200903.11
- [12] Vodinchar G. M., Kazakov E. A. Elimination of the integral term in the equations of one hereditary system related to the hydromagnetic dynamo. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2023, vol. 42. no. 1, 180-190. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-42-1-180-190.
- [13] Vodinchar G., Kazakov E. The Lorenz system and its generalizations as dynamo models with memor. *E3S Web of Conf.* 2018, vol. 62. p. 02011. DOI: 10.1051/e3sconf/20186202011
- [14] Demidovich B. P., Maron I. A., Shuvalova E. Z. *Chislennyye metody analiza. Priblizhenie funkciy, differencial'nye i integral'nye uravneniya. [Numerical methods of analysis. Approximation functions, differential and integral equations.]* Moscow. Nauka, 1967.
- [15] Dekker K., Verwer J. *Ustojchivost' metodov Runge- Kuty dlya zhestkih nelinejnyh differencial'nyh uravnenij [Stability of Runge-Kutta methods for rigid nonlinear differential equations.]* Moscow. Mir, 1988.
- [16] Khashin S.I. Ocenka pogreshnosti klassicheskikh metodov Runge–Kutty [Error estimation of classical Runge–Kutta methods]. *Comput. Math. Math. Phys. fiz.*, 2014. T. 54, No. 5, pp. 746–754.
- [17] Gautschi W. *Numerical analysis*. Springer: Science & Business Media, 2011.

Information about the author



Kazakov Evgeny Anatolevich ✉ – Junior Researcher, Laboratory of electromagnetic propagation, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,
ORCID 0000-0001-7235-4148.



Алгоритм выделения следа искусственного сигнала вистлера в спектрограмме с помощью интегрированной среды разработки приложений PyCharm

Л. С. Марченко^{*1,2}

¹ Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7, Россия

² Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, 683002, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Северо-Восточное шоссе, 30, Россия

Аннотация. В работе предложен алгоритм выделения следа искусственного сигнала свистящего атмосферика (вистлера) в спектрограмме, реализованный на языке Python в интегрированной среде разработки PyCharm 2024.1. Алгоритм позволяет с помощью установки некоторого порогового значения (фильтра) выделить след вистлера. Фильтр учитывает интенсивность сигнала в спектре, стандартное отклонение значений от среднего, а также некоторый множитель, который позволяет исключить шум и выделить только более значимые пики в сигнале. В алгоритме с помощью маски на основе фильтра удается получить массив частот для следа искусственного вистлера. Компьютерная программа позволяет сохранять полученный массив в текстовый файл, который можно использовать для дальнейшего анализа в различных табличных процессорах, а также строить графики следа вистлера для визуального исследования. В статье была произведена проверка адекватности алгоритма на примере расчета коэффициента дисперсии. Показано, что алгоритм дает хорошие результаты.

Ключевые слова: искусственный вистлер, спектрограмма, след, фильтр, маска, Python, PyCharm

Получение: XX.11.2024; Исправление: XX.11.2024; Принятие: XX.11.2024; Публикация онлайн: XX.11.2024

Для цитирования. Марченко Л. С. Алгоритм выделения следа искусственного сигнала вистлера в спектрограмме с помощью интегрированной среды разработки приложений PyCharm // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2024. Т. 49. № 4. С. 68-80. EDN: YLXDQQ. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-68-80>.

Финансирование. Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № НИОКТР 124012300245-2).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

***Корреспонденция:**  E-mail: marchenko@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Марченко Л. С., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)





Algorithm for Extracting an Artificial Whistler Signal in a Spectrogram Using the PyCharm Integrated Application Development Environment

*L. S. Marchenko**

¹ Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034, Kamchatka, Elizovsky District, Paratunka, 7 Mirnaya street, Russia

² Scientific Research Geotechnological Centre FEB RAS, 683002, Petropavlovsk-Kamchatsky, 30 Severo-Vostochnoye highway, Russia

Abstract. The paper proposes an algorithm for identifying the trace of an artificial whistling atmospheric signal (whistle) in a spectrogram, implemented in Python in the PyCharm 2024.1 integrated development environment. The algorithm allows you to identify the whistler trace by setting a certain threshold value (filter). The filter takes into account the signal intensity in the spectrum, the standard deviation of values from the mean, and a certain multiplier that allows you to exclude noise and identify only the most significant peaks in the signal. In the algorithm, using a mask based on the filter, it is possible to obtain an array of frequencies for the trace of an artificial whistler. The computer program allows you to save the resulting array in a text file, which can be used for further analysis in various spreadsheet processors, as well as build whistler trace graphs for visual research. The article tested the adequacy of the algorithm using the example of calculating the dispersion coefficient. It was shown that the algorithm gives good results.

Key words: artificial whistler, spectrogram, trace, filter, mask, Python, PyCharm

Received: XX.11.2024; Revised: XX.11.2024; Accepted: XX.11.2024; First online: XX.11.2024

For citation. Marchenko L. S. Algorithm for extracting an artificial whistler signal in a spectrogram using the pycharm integrated application development environment. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 68-80. EDN: YLXDQQ. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-68-80>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (Reg. No. NIOKTR 124012300245-2).

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. Author is solely responsible for providing the final version of the article in print.

*Correspondence:  E-mail: marchenko@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Marchenko L. S., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

В последние десятилетия наблюдение и анализ электромагнитных волн, связанных с природными явлениями, стали важной областью исследований в физике плазмы и геофизике [1, 2]. Одним из наиболее интересных аспектов таких исследований является изучение вистлеров - низкочастотных электромагнитных волн, возникающих в результате грозových разрядов с последующим взаимодействием с магнитосферой Земли [3–11, 11]. Эти волны играют ключевую роль в динамике плазмы и могут оказывать значительное влияние на радиосигналы и системы связи. Свое название вистлеры (свисты или свистящие атмосферерики) получили из-за характерного звука, который они производят при преобразовании в звуковые волны.

Теоретические основы исследования вистлеров более подробно и системно были изложены в фундаментальных работах [12–14]. Дальнейшее исследование вистлеров получило широкое развитие в работах различных ученых, как зарубежных [3–8], так и российских [9–11, 11].

Отметим, что наиболее важными являются задачи исследования источников вистлеров – грозových разрядов [9–11], а также распознавания вистлеров в реальном времени [11]. К сожалению задача распознавания вистлеров в реальном времени до конца не была решена методами машинного обучения в силу сложности идентификации вистлеров по спектрограммам.

В работе Шагимуратова И.А. [15] подробно изложена теория исследования динамических спектров вистлеров, в которой указывается на важность определения следа вистлера, что в свою очередь дает возможность применять многоточечные методы обработки.

В настоящей работе для искусственно смоделированного вистлера [16] был разработан на языке Python в среде PyCharm 2024.1 алгоритм выделения его следа из спектрограммы. Данный алгоритм далее планируется применить для исследования характеристик искусственного вистлера согласно работе [15], а потом его адаптировать для исследования реальных сигналов вистлера, полученных с помощью ОНЧ-пеленгатора ИКИР ДВО РАН

Функциональная модель алгоритма

Интегрированная среда разработки (IDE) PyCharm 2024.1 для языка программирования Python имеет ряд преимуществ по сравнению с другими версиями PyCharm [17]: улучшенная поддержка AI: встроенные инструменты на базе искусственного интеллекта помогают в написании кода, предоставляя автозаполнение, рекомендации и исправления; оптимизированный интерфейс: новый интерфейс стал более интуитивно понятным и удобным, что упрощает навигацию и работу с проектами; расширенные возможности рефакторинга: новые инструменты для рефакторинга позволяют быстро и безопасно изменять структуру кода без риска появления ошибок: поддержка новых

технологий: улучшена поддержка последних версий Python и популярных библиотек, таких как Django, Flask и других; инструменты для тестирования: улучшенные функции для написания и запуска тестов, включая поддержку новых фреймворков и расширенные возможности анализа результатов; оптимизация производительности: повышенная скорость работы IDE, улучшенное использование ресурсов системы и уменьшение времени загрузки проектов; поддержка многопоточности: улучшенная работа с асинхронным кодом и многопоточностью, что делает разработку более эффективной.

На рис.1 приведена блок-схема алгоритма выделения следа искусственного вистлера в среде PyCharm 2024.1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма в среде PyCharm.

Figure 1. Block diagram of the algorithm in the PyCharm environment.

Из блок-схемы на рис.1. мы можем выделить следующие этапы алгоритма:

1. Построение искусственного вистлера. Этот этап был подробно рассмотрен в работе автора [16].

2. Фильтрация искусственного сигнала вистлера. Установка порога для выделения следа искусственного вистлера.

3. Проверка работы алгоритма на примере вычисления коэффициента дисперсии.

Построение искусственного вистлера

Мы здесь приведем лишь фрагмент кода на языке Python, более полный код смотрите в работе [16]. Значения параметров искусственного сигнала возьмем также из работы [16].

```
# Подключение необходимых библиотек Python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy import signal
from tkinter import Tk
from tkinter.filedialog import asksaveasfilename
import pandas as pd
# Параметры модели, [17]
Dis = 100 # Коэффициент дисперсии
f_min = 1000 # Минимальная частота, Гц
f_max = 8000 # Максимальная частота, Гц
t_max = 3 # Максимальное время, с
fs = 50000 # Частота дискретизации, Гц
```

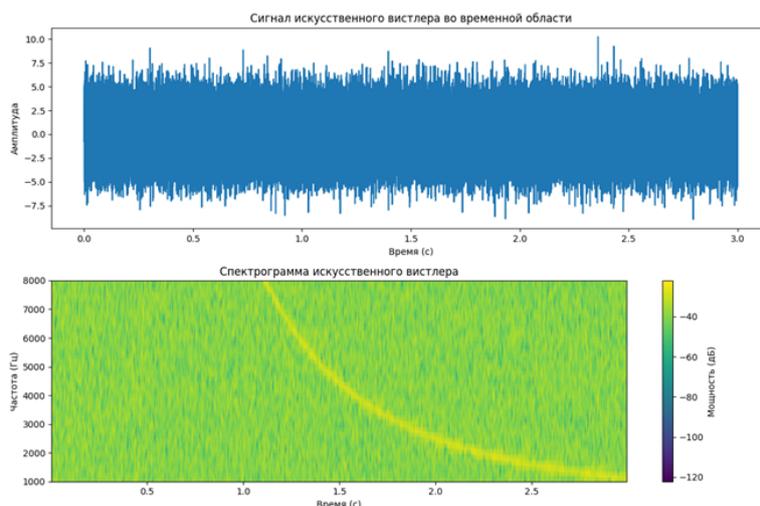


Рис. 2. Искусственный вистлер при $D = 100 \text{ с}^{1/2}$ [16].

Figure 2. Artificial whistler at $D = 100 \text{ с}^{1/2}$ [16].

Описание фильтра для выделения следа искусственного вистлера

В этом пункте мы опишем фильтрацию для выделения следа искусственного сигнала вистлера на рис. 2. Для этой цели установка порога для выделения следа на языке Python имеет вид:

$$\text{threshold} = \text{np.mean}(S_{xx}) + k * \text{np.std}(S_{xx}).$$

Здесь мы устанавливаем пороговое значение (`threshold`), которое будет использоваться для выделения значимых участков в спектрограмме; `np.mean(Sxx)` вычисляет среднее значение всех элементов в массиве `Sxx`, который представляет собой спектрограмму и показывает, какова типичная интенсивность сигнала в спектре; `np.std(Sxx)` вычисляет стандартное отклонение элементов в `Sxx`, оно указывает, насколько значения в массиве разбросаны относительно среднего; `k * np.std(Sxx)` - умножение стандартного отклонения на `k` позволяет установить порог выше среднего значения, учитывая разброс данных, что помогает исключить шум и выделить только более значимые пики.

$$\text{Создание маски: } \text{mask} = S_{xx} > \text{threshold}.$$

Здесь мы создаем логическую маску (`mask`), которая будет содержать `True` для всех точек в `Sxx`, где интенсивность превышает установленный порог (`threshold`), и `False` в противном случае.

Это позволяет нам выделить области в спектрограмме, где интенсивность сигнала значительно выше среднего уровня, что может указывать на наличие интересующих нас вистлеров.

Заметим, что мы выбрали простой пороговый метод. Однако можно использовать более сложный метод пороговой обработки, например, известны такие методы: адаптивный пороговый метод, который зависит от локальных характеристик сигнала; метод Оцу [18] — метод используется для нахождения оптимального порога, который минимизирует внутриклассовую дисперсию; краевые методы — алгоритмы для нахождения краев сигнала, такие как метод Собеля или Кэнни [19, 20].

Код на языке Python, характеризующий работу фильтра имеет вид:

```
# 1. Установка порога для выделения следа
threshold = np.mean(Sxx) + 10 * np.std(Sxx) # Простой порог
# 2. Создаем маску
mask = Sxx > threshold
# 3. Получаем индексы, где маска равна True
indices = np.where(mask)
# 4. Сохранение значений частоты и времени в текстовый файл
Tk().withdraw() # Скрыть основное окно
file_path = asksaveasfilename(defaulttextextension=".txt",
filetypes=[("Text files", "*.txt"), ("All files", "*.*")],
```

```
title="Сохранить как")
if file_path: # Проверка, что путь был выбран
# Создаем DataFrame с частотой и временем
data = {
    'Частота (Гц)': f[indices[0]],
    'Время (с)': t_сpec[indices[1]]
}
results_df = pd.DataFrame(data)

# Сохраняем в текстовый файл
results_df.to_csv(file_path, sep='\t', index=False, header=True)
print(f"Файл сохранен: {file_path}")
else:
print("Сохранение отменено.")
# 5. Построение графика частот свистящего атмосферика
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.scatter(t_сpec[indices[1]], f[indices[0]], s=10, color='blue',
alpha=0.5) # Используем scatter для отображения точек
plt.title('Выделенные следа свистящего атмосферика')
plt.xlabel('Время (с)')
plt.ylabel('Частота (Гц)')
plt.ylim(f_min, f_max)
plt.grid()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

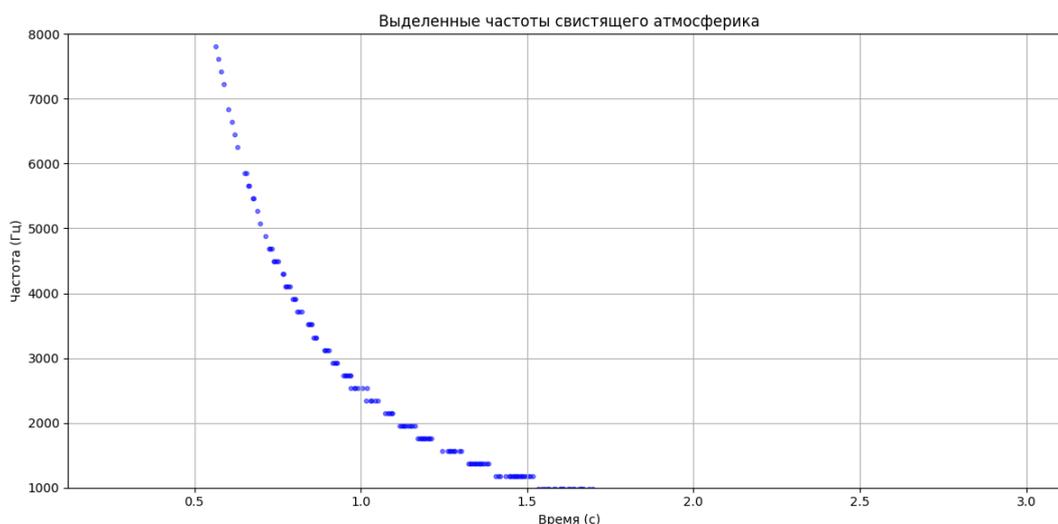


Рис. 3. График следа искусственного вистлера из рис.2.
Figure 3. Graph of the trace of the artificial whistler from Fig. 2.

Вычисление коэффициента дисперсии

След искусственного вистлера на рис. 3 позволяет исследовать его характеристики. Покажем, что след искусственного вистлера найден корректно. Для этого мы найдем коэффициент дисперсии по углу наклона прямой построенной по точкам $(1/\sqrt{f}, t)$. Методика расчета коэффициента дисперсии подробно описана в книге [12].

Код на языке Python для расчета коэффициента дисперсии.

```
# Создаем дополнительную таблицу с временем t и 1/f^(1/2)
additional_data = {
    'Время (с)': t_spec[indices[1]][valid_indices], # t
    '1/f^(1/2)': 1 / np.sqrt(f[indices[0]][valid_indices]) # 1/f^(1/2)
}
additional_df = pd.DataFrame(additional_data)
# Сохранение дополнительной таблицы в отдельный файл
additional_file_path = asksaveasfilename(defaultextension=".txt",
filetypes=[("Text files", "*.txt"), ("All files", "*.*")],
title="Сохранить дополнительную таблицу как")
if additional_file_path: # Проверка, что путь был выбран
additional_df.to_csv(additional_file_path, sep='\t', index=False, header=True)
print(f"Дополнительная таблица сохранена: {additional_file_path}")
# Построение графика для дополнительной таблицы
X = additional_df['Время (с)'].values.reshape(-1, 1)
y = additional_df['1/f^(1/2)'].values
# Линейная регрессия
model = LinearRegression()
model.fit(X, y)
# Получаем тангенс угла наклона и свободный член
tangent = model.coef_[0]
intercept = model.intercept_
# Уравнение линейной регрессии
equation = f'y = {tangent:.4f} * t + {intercept:.4f}'
# Вычисление котангенса угла наклона
cotangent = 1 / tangent
# Построение графика
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.scatter(X, y, color='blue', label='Данные')
plt.plot(X, model.predict(X), color='red', label='Линейная регрессия')
plt.title('График зависимости времени от 1/f^(1/2)')
plt.xlabel('Время (с)')
plt.ylabel('1/f^(1/2)')
plt.legend()
plt.grid()
```

```
# Вывод уравнения на график
plt.text(0.05, 0.95, equation, transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=12, verticalalignment='top', color='black')
plt.tight_layout()
plt.show()
```

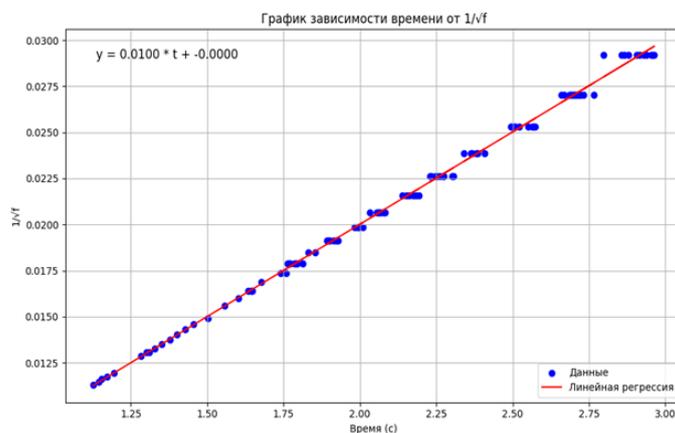


Рис. 4. Данные, полученные по следу искусственного вистлера (точки) при $D = 100 \text{ c}^{1/2}$, прямая линия – уравнение линейной регрессии.

Figure 4. Data obtained from the trail of an artificial whistler (points) at $D = 100 \text{ c}^{1/2}$, the straight line is the linear regression equation.

Из рис.4 видно, что угловой коэффициент или тангенс угла наклона равен 0.01, тогда расчетный коэффициент дисперсии $D_R = 1/0.01 = 100 \text{ c}^{1/2}$. Отсюда следует, что расчетный коэффициент D_R совпадает с теоретическим коэффициентом D .

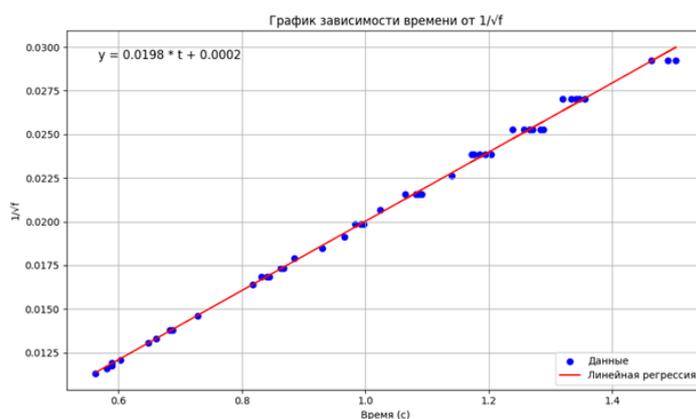


Рис. 5. Данные полученные по следу искусственного вистлера (точки) при $D = 50 \text{ c}^{1/2}$, прямая линия – уравнение линейной регрессии.

Figure 5. Data obtained from the trail of an artificial whistler (points) at $D = 50 \text{ c}^{1/2}$, the straight line is the linear regression equation.

Из рис.5 видно, что тангенс угла наклона равен 0.0198, тогда расчетный коэффициент дисперсии $D_R = 1/0.0198 = 50.45 \text{ с}^{1/2}$. Отсюда следует, что расчетный коэффициент D_R практически совпадает с теоретическим коэффициентом $D = 50 \text{ с}^{1/2}$.

Отметим, что коэффициент дисперсии можно рассчитать согласно математической модели, предложенной в статье [16]: $D_M = T\sqrt{f_T}$, где T — время существования вистлера, в нашем случае это последнее время в отчете текстового файла, которое генерируется нашей программой, f_T — частота соответствующая времени T . Тогда мы получаем следующие значения:

$$D_M = 0.70144\sqrt{5078.124999999999} = 49,985 \text{ с}^{1/2} \text{ при теоретической } D = 50 \text{ с}^{1/2},$$

$$D_M = 2.17536\sqrt{2148.4374999999995} = 100.83 \text{ с}^{1/2} \text{ при теоретической } D = 100 \text{ с}^{1/2}.$$

Мы видим, что оценки, полученные по математической модели, также дают приемлемый результат

Заключение

В работе предложен алгоритм выделения следа искусственного вистлера из спектрограммы на языке Python в среде PyCharm 2024.1. С помощью фильтрации определяются необходимые частоты и времена, которые им соответствуют и характеризуют след искусственного вистлера. Далее, чтобы проверить адекватность алгоритма, был произведен расчет коэффициента дисперсии по уравнению линейной регрессии. Показано, что алгоритм является адекватным и дает приемлемые результаты.

Отметим, что следующим этапом развития работы является исследование реальных сигналов вистлеров, полученные с помощью ОНЧ-пеленгатора в ИКИР ДВО РАН. Следует подчеркнуть, что природные сигналы являются более сложными, так как помимо вистлеров регистрируются атмосферники. Поэтому необходимо будет корректировать алгоритм на этапе фильтрации с возможным применением машинного обучения и других методов обработки изображений.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Паровику Р.И. за ценные советы, которые послужили улучшению статьи.

Список литературы

1. Artekha S. N., Belyan A. V. On the role of electromagnetic phenomena in some atmospheric processes, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2013. vol. 20, no. 3, pp. 293-304 DOI:10.5194/npg-20-293-2013.
2. Mahmood N., Edminister J.A. *Schaum's Outline of Electromagnetics*. New York: McGraw Hill, 2019.
3. Lichtenberger J., Ferencz C., Bodnár L. et al. Automatic whistler detector and analyzer system: Automatic whistler detector, *Geophys. Res.*, 2008. vol. 113.
4. Koroncay D., Lichtenberger J., Clilverd M. A. et al. The source regions of whistlers, *Journal of Geophysical Research: Space-Physics*, 2019. vol. 124, pp. 5082–5096.
5. Li W., Shen X.-C., Menietti J. D. et al. Global distribution of whistler mode waves in Jovian inner magnetosphere, *Geophysical Research Letters*, 2020. vol. 47, no. 15. DOI: 10.1029/ 2020GL088198.

6. Morris P.J., Bohdan A., Weidl M. S. et al. Pre-acceleration in the electron foreshock. II. oblique whistler waves, *The Astrophysical Journal*, 2023. vol. 944, no. 1 DOI: 10.3847/1538-4357/acaec8.
7. Sonwalkar V. S., Reddy A. Specularly reflected whistler: A low-latitude channel to couple lightning energy to the magnetosphere, *Science Advances*, 2024. vol. 10., no. 33 DOI: 10.1126/sciadv.ado2657.
8. Xiang T., Liu M., He S., Wang X., Zhou C. Automatic segmentation model and parameter extraction algorithm for lightning whistlers, *Radio Science*, 2024. vol. 59, no. 11 DOI: 10.1029/2024RS007984.
9. Чернева Н. В., Водинчар Г. М., Сивоконь В. П. и др. Корреляционный анализ потоков свистящих атмосфериков и грозových разрядов, *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2013. Т. 7, №2, С. 59–67 DOI: 10.18454/2079-6641-2013-7-2-59-67.
10. Сивоконь В. П., Богданов В. В., Дружин Г. И. и др. Модуляция вистлеров, *Геомагнетизм и аэрoномия*, 2014. Т. 54, №6, С. 851–851 DOI: 10.7868/S0016794014060182.
11. Малыш Е. А. Алгоритм для автоматического распознавания свистящих атмосфериков в режиме реального времени, *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2015. №2(11), С. 82-87 DOI: 10.18454/2079-6641-2015-11-2-82-87.
12. Малкин Е. И., Казаков Е. А., Санников Д. В и др. Статистическая связь между вистлерами и спрайтами по данным AWDANET и WWLLN, *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2022. Т. 41, №4, С. 178-190 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-178-190.
13. Storey L. R. O. An investigation of whistling atmospherics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1953. vol. 246, no. 908, pp. 113-141.
14. Гершман Б. Н., Коробков Ю. С. К теории распространения свистящих атмосфериков, *Известия вузов. Серия Радиофизика*, 1958. Т. 1, №2, С. 51-58.
15. Гершман Б. Н., Угаров В. А. Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере, *Успехи физических наук*, 1960. Т. 72, №2, С. 235-271.
16. Шагимуратов И.И. *Вариации электронной концентрации в плазмoсфере по данным свистящих атмосфериков*, специальность 01.04.12. М., 1985. 189 с.
17. Марченко Л. С. Паровик Р.И. Моделирование искусственных вистлеров в среде PyCharm, *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*, 2024. Т. 26, №5, С. 53-63 DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-5-53-63.
18. Van Horn, B. M. II, Nguyen Q. *Hands-On Application Development with PyCharm: Build Applications like a Pro with the Ultimate Python Development Tool*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd., 2023.
19. Talab A. M. A. et al. Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques, *Optik*, 2016. vol. 127, no. 3, pp. 1030-1033.
20. Mathur N., Mathur S., Mathur D. A novel approach to improve sobel edge detector, *Procedia Computer Science*, 2016. vol. 93, pp. 431-438.
21. Yan X., Li Y. A method of lane edge detection based on Canny algorithm, *IEEE*, 2017. 2120-2124 pp.

Информация об авторе



Марченко Людмила Сергеевна ✉ – ведущий специалист учёного секретариат института космoфизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, аспирант, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия,  ORCID /0000-0003-3634-2443.

References

- [1] Artekha S. N., Belyan A. V. On the role of electromagnetic phenomena in some atmospheric processes. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2013. vol. 20. no. 3. P. 293-304. DOI:10.5194/npg-20-293-2013.
- [2] Mahmood N., Edminister J.A. *Schaum's Outline of Electromagnetics*. 5th ed. New York: McGraw Hill. 2019.
- [3] Lichtenberger J., Ferencz C., Bodnár L. et al. Automatic whistler detector and analyzer system: Automatic whistler detector. *Geophys. Res.* 2008. vol. 113.
- [4] Koronczay D., Lichtenberger J., Clilverd M. A. et al. The source regions of whistlers. *Journal of Geophysical Research: Space-Physics*, 2019. Vol. 124, Pp. 5082–5096.
- [5] Li W., Shen X.-C., Menietti J. D. et al. Global distribution of whistler mode waves in Jovian inner magnetosphere. *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47. No. 15. DOI: 10.1029/2020GL088198.
- [6] Morris P.J., Bohdan A., Weidl M. S. et al. Pre-acceleration in the electron foreshock. II. oblique whistler waves. *The Astrophysical Journal*. 2023. vol. 944. No. 1. Id 13. DOI: 10.3847/1538-4357/acaec8.
- [7] Sonwalkar V. S., Reddy A. Specularly reflected whistler: A low-latitude channel to couple lightning energy to the magnetosphere. *Science Advances*. 2024. Vol. 10. No. 33. eado2657. DOI: 10.1126/sciadv.ado2657.
- [8] Xiang T., Liu M., He S., Wang X., Zhou C. Automatic segmentation model and parameter extraction algorithm for lightning whistlers. *Radio Science*. 2024. vol. 59. no. 11. e2024RS007984. DOI: 10.1029/2024RS007984.
- [9] Cherneva N.V., Vodinchar G.M., Sivokon V.P. et al. Correlation analysis of fluxes of whistling atmospheric and lightning discharges *Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2013. Vol. 7. No. 2. Pp. 59–67. DOI: 10.18454/2079-6641-2013-7-2-59-67. (In Russian)
- [10] Sivokon V.P., Bogdanov V.V., Druzhin G.I. et al. Whistler modulation. *Geomagnetizm i Aeronomiya*. 2014. vol. 54. no. 6. P. 851–851. DOI: 10.7868/S0016794014060182. (In Russian)
- [11] Malush E.A. Algorithm for automatic recognition of whistling atmospheric in real time. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2015. No. 2(11). P. 82–87. DOI: 10.18454/2079-6641-2015-11-2-82-87. (In Russian)
- [12] Malkin E.I., Kazakov E.A., Sannikov D.V. et al. Statistical relationship between whistlers and sprites according to AWDANET and WWLLN. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2022. Vol. 41. No. 4. P. 178–190. (In Russian)
- [13] Storey L. R. O. An investigation of whistling atmospheric. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1953. vol. 246. no. 908. P. 113-141.
- [14] Gershman B.N., Korobkov Yu.S. On the theory of propagation of whistling atmospheric. *Izvestiya Vuzov. Radiofizika*. 1958. Vol. 1. No. 2. Pp. 51–58. (In Russian)
- [15] Gershman B.N., Ugarov V.A. Propagation and generation of low-frequency electromagnetic waves in the upper atmosphere. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 1960. Vol. 72. No. 2. P. 235–271. (In Russian)
- [16] Shagimuratov I. I. Variations of electron concentration in the plasmasphere according to whistling atmospheric data: specialty 01.04.12. Moscow: 1985. 189 p. (In Russian)
- [17] Marchenko L.S., Parovik R.I. Modeling artificial whistlers in Pycharm. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 5. P. 53–63. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-5-53-63. (In Russian)

- [18] Van Horn, B. M., II; Nguyen, Q. Hands-On Application Development with PyCharm: Build Applications like a Pro with the Ultimate Python Development Tool; Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2023.
- [19] Talab A. M. A. et al. Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques. *Optik*. 2016. vol. 127. no. 3. P. 1030-1033.
- [20] Mathur N., Mathur S., Mathur D. A novel approach to improve sobel edge detector. *Procedia Computer Science*. 2016. vol. 93. P. 431-438.
- [21] Yan X., Li Y. A method of lane edge detection based on Canny algorithm. *IEEE*. 2017. P. 2120-2124.

Information about the author



Marchenko Ludmila Sergeevna ✉ – leading specialist of the scientist Secretariat of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, postgraduate student, Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  ORCID 0000-0003-3634-2443.



Анализ вариаций геомагнитного поля по результатам интерактивной системы «Аврора»

Ю. А. Полозов*, О. В. Мандрикова

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Паратунка, ул. Мирная 7, Россия

Аннотация. В статье описана геомагнитная компонента системы «Аврора», выполняющая оценку состояния магнитного поля Земли по данным станций «Паратунка» (Камчатский край, 52.97 N, 158.24 E) и «Хабаровск» (47.61 N, 134.69 E). Данные получены путем прямых измерений на магнитных обсерваториях. Геомагнитная компонента системы «Аврора» разработана в ИКИР ДВО РАН. Функции данной компоненты базируются на новых подходах и методах, построенных коллективом ученых лаборатории Системного анализа. Разработанные методы основаны на синтезе элементов теории вейвлет-преобразования с методами теории вероятностей и математической статистики. Система обеспечивает комплексную оценку состояния магнитного поля Земли в возмущенные и спокойные периоды и дает возможность изучать пространственно-временные особенности и динамику процессов в магнитосфере Земли. Заключение о состоянии магнитного поля формируется в оперативном режиме. Анализ работы системы в периоды рассмотренных в статье событий подтвердил возможность возникновения слабых короткопериодных синхронных геомагнитных возмущений, предшествующих началу магнитных бурь. Рассмотренная в статье геомагнитная компонента дополняет комплексный анализ данных геофизического мониторинга в системе и является важнейшей ее частью. Результаты геомагнитной компоненты системы «Аврора» могут быть использованы в качестве дополнительного инструмента в задачах оперативного прогноза космической погоды.

Ключевые слова: геомагнитное поле, анализ данных, вейвлеты, магнитные бури

Получение: XX.11.2024; Исправление: XX.11.2024; Принятие: XX.11.2024; Публикация онлайн: XX.11.2024

Для цитирования. Полозов Ю. А., Мандрикова О. В. Анализ вариаций геомагнитного поля по результатам интерактивной системы «Аврора» // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 81-93. EDN: BIVINBR. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-81-93>.

Финансирование. Работа выполнена за счет Гос. задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция: ✉ E-mail: polozov@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Полозов Ю. А., Мандрикова О. В., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)





Analysis of Geomagnetic Field Variations Based on the Results of the «Aurora» Interactive System

*Y. A. Polozov**, *O. V. Mandrikova*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Russia,
684034, Paratunka, Mirnay St. 7

Abstract. This paper describes the geomagnetic component of the Aurora system, which assesses the state of the Earth's magnetic field using data from the Paratunka (Kamchatka Krai, 52.97 N, 158.24 E) and Khabarovsk (47.61 N, 134.69 E) stations. The data were obtained by direct measurements at magnetic observatories. The geomagnetic component of the Aurora system was developed at IKIR FEB RAS. The functions of this component are based on new approaches and methods developed by the team of scientists of the System Analysis Laboratory. The developed methods are based on the synthesis of elements of wavelet transform theory with methods of probability theory and mathematical statistics. The system provides a comprehensive assessment of the state of the Earth's magnetic field in disturbed and calm periods and enables the study of spatial and temporal features and dynamics of processes in the Earth's magnetosphere. The conclusion about the state of the magnetic field is formed in the operational mode. The analysis of the system operation during the periods of the events considered in the article confirmed the possibility of weak short-period synchronous geomagnetic disturbances preceding the onset of magnetic storms. The geomagnetic component considered in the article complements the complex analysis of geophysical monitoring data in the system. The results of the geomagnetic component of the Aurora system can be used as an additional tool in the tasks of operational space weather forecasting.

Key words: geomagnetic field, data analysis, wavelets, magnetic storms.

Received: XX.11.2024; Revised: XX.11.2024; Accepted: XX.11.2024; First online: XX.11.2024

For citation. Polozov Y. A., Mandrikova O. V. Analysis of geomagnetic field variations based on the results of the «Aurora» interactive system. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 81-93. EDN: BIVINBR. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-81-93>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (subject registration No. 124012300245-2).

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: polozov@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Polozov Y. A., Mandrikova O. V., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Регистрируемые геофизические параметры содержат важную информацию о состоянии природной среды. Анализ данных околоземного космического пространства (параметры состояния межпланетного пространства, магнитосферы, ионосферы и др.), являющихся объектом этого исследования, позволяет получить важную информацию о состоянии космической погоды [1–3]. Своевременная обработка и анализ поступающих данных измерений дает возможность оперативно выявлять аномальные процессы, давать заключение о состоянии околоземного пространства и формировать прогноз ожидаемых явлений.

В статье описаны функции геомагнитной компоненты системы «Аврора» (<http://lsaoperanalysis.ikir.ru:9180/lsaoperanalysis.html>) и приведены результаты её функционирования в периоды магнитных бурь. Геомагнитная компонента системы «Аврора» разработана в ИКИР ДВО РАН. Функции данной компоненты базируются на новых подходах и методах, построенных коллективом ученых лаборатории Системного анализа [4, 5]. Разработанные методы основаны на синтезе элементов теории вейвлет-преобразования с методами теории вероятностей и математической статистики. Вейвлет-преобразование позволяет исследовать нестационарные изменения в геофизических данных и широко применяется в области физики и, в частности, в геофизике. Использование вейвлетов обеспечивает возможность обнаружения и анализа короткопериодных вариаций, возникающих в данных в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь [6–10].

Предметом данного исследования являются вариации магнитного поля Земли, получаемые путем прямых измерений на магнитных обсерваториях (станция «Паратунка» и станция Хабаровск, ИКИР ДВО РАН) [11]. Архивные и текущие массивы геомагнитных данных, открытый доступ к которым организован в системе «Аврора», дают возможность изучать пространственно-временные особенности и динамику процессов в магнитосфере Земли [12, 13]. В статье приведены примеры регистрируемых вариаций геомагнитного поля в спокойные и возмущенные периоды. Показаны выделенные системой «Аврора» короткопериодные синхронные возмущения на станциях «Паратунка» и «Хабаровск» накануне и во время магнитных бурь. Рассмотренная в статье геомагнитная компонента дополняет комплексный анализ данных геофизического мониторинга в системе и является важнейшей её частью.

Описание функций геомагнитной компоненты

Программные модули геомагнитной компоненты выполняют обработку минутных данных горизонтальной компоненты (Н-компоненты) напряженности магнитного поля Земли. Функции системы обеспечивают оценку интенсивности геомагнитных возмущений и выполняют выделение периодов слабой и сильной геомагнитной активности. Данные функции описаны ниже.

Оценка интенсивности геомагнитных возмущений выполняется на основе применения непрерывного вейвлет-преобразования. Непрерывное вейвлет-преобразование данных, определяется формулой [14, 15]

$$W_{\Psi}f_{b,a} := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где a — масштаб Ψ — базисный вейвлет.

Замечание. Преобразование (1) выполняется численно по алгоритму, аналогичному алгоритму, реализованному в системе Matlab. Перед выполнением преобразования (1) для уменьшения влияния краевого эффекта временной ряд данных $f_N = \{f_n\}_{n=0, \overline{N}}$ дополняется значениями по правилу:

$$f_{N+2L} = \{f_L, \dots, f_2, f_1, f_0, \dots, f_N, f_{N-1}, f_{N-2}, \dots, f_{N-L}\},$$

где $L = \Omega * a_{\max}$, $(2\Omega + 1)$ — носитель вейвлета (см. (1)), a_{\max} — наибольший масштаб вейвлет-преобразования. После выполнения вейвлет-преобразования коэффициенты $W_{\Psi}f_{b,a}$, соответствующие дополненным значениям, удаляются. Интенсивность геомагнитных возмущений в момент времени $t = b$ на анализируемом масштабе a оценивается на основе величины:

$$e_{b,a} = |(W_{\Psi}f)(b, a)|$$

Интенсивность возмущений поля в $t = b$ оценивается по формуле:

$$E_b = \sum_a e_{b,a}.$$

В обработке используется базисный вейвлет Добеши порядка 3 (см. рис. 1), имеющий следующие свойства: ортогональный, обладает компактным носителем.

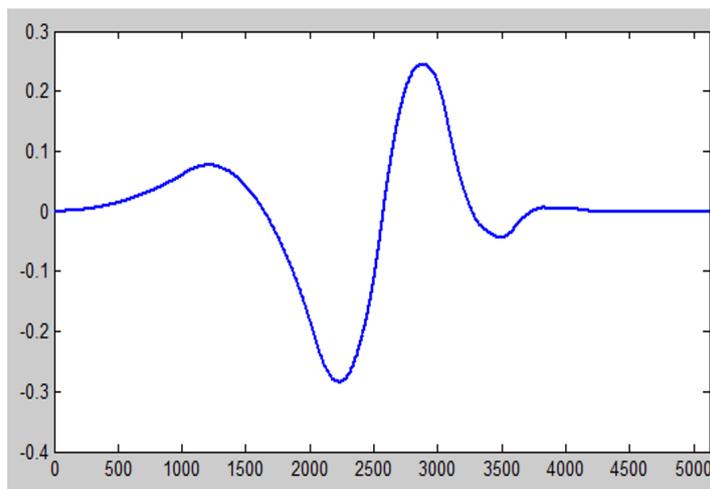


Рис. 1. Вейвлет Добеши порядка 3.
[Figure 1. Dobeshi wavelet of order 3.]

Ортогональность вейвлета обеспечивает численную устойчивость разложений данных, компактный носитель вейвлета позволяет минимизировать погрешности при аппроксимации данных (см. *Определение*).

Определение [14]. Если базисный вейвлет Ψ имеет компактный носитель, равный $[-\Omega, \Omega]$, то носитель $\Psi_{b,a}$ на масштабе a равен $[b - \Omega a, b + \Omega a]$. Точка ξ содержится в носителе $\Psi_{b,a}$, если $|b - \xi| \leq \Omega a$.

Выделение периодов слабой и сильной геомагнитной активности выполняется на каждом масштабе a непрерывного вейвлет-преобразования на основе применения следующих пороговых функций:

$$P_{T_{a,1}}(e_{b,a}) = \begin{cases} 0, & \text{если } e_{b,a} < T_{a,1} \\ e_{b,a}, & \text{если } e_{b,a} \geq T_{a,1} \end{cases}, \quad P_{T_{a,2}}(e_{b,a}) = \begin{cases} 0, & \text{если } e_{b,a} < T_{a,2} \\ e_{b,a}, & \text{если } e_{b,a} \geq T_{a,2} \end{cases},$$

где пороги $T_{a,1}$ на каждом масштабе выделяют слабые и сильные возмущения, а пороги значения $T_{a,2}$ на каждом масштабе выделяют сильные возмущения.

Оценка порогов $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$ выполнялась путем минимизации апостериорного риска. Экспериментальной базой в оценках являлись геомагнитные данные обсерватории «Паратунка» (Камчатский край) за период 2002-2010 г. Путем обработки «спокойных» дней (трехчасовые значения К-индекса которых не превышали значения 2, а суммарные суточные не превышали значения 8) на каждом масштабе a были оценены пороговые значения $T_{a,1}$. На основе обработки «слабовозмущенных» дней (трехчасовые значения К-индекса которых не превышали значения 4, а суммарные суточные не превышали значения 18) на каждом масштабе a были оценены пороговые значения $T_{a,2}$. Результаты расчета $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$ для рассматриваемых масштабов показаны на рис. 2.

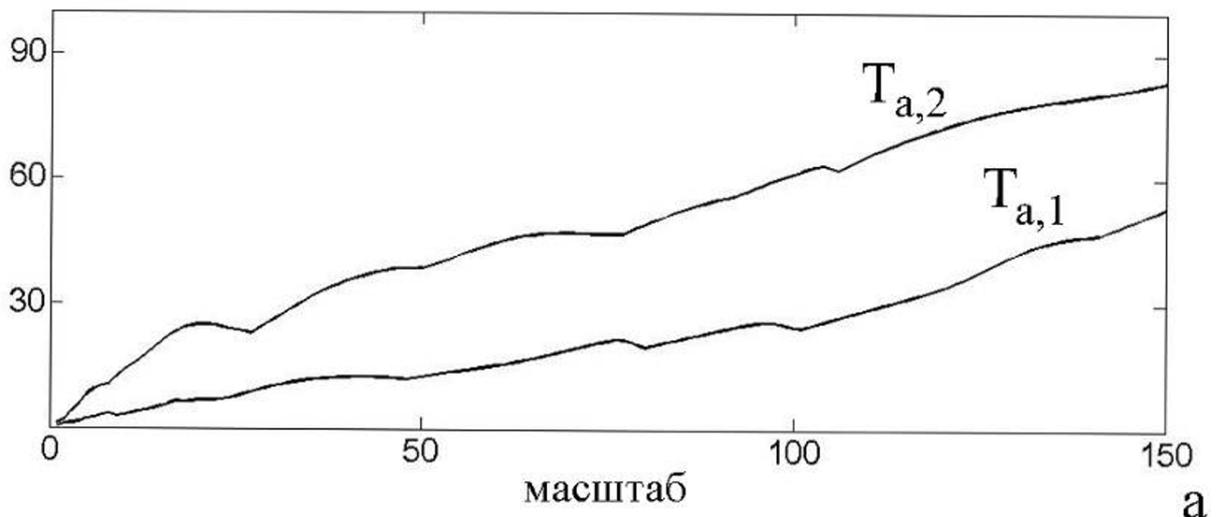


Рис. 2. Результаты расчета пороговых значений $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$. На оси ox отмечены масштабы a , на оси oy - значения $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$.

[Figure 2. Calculation results for threshold values $T_{a,1}$ and $T_{a,2}$. On the ox axis are the scales of a , on the oy axis are the values of $T_{a,1}$ и $T_{a,2}$.]

Общая схема оценки состояния геомагнитных данных для станций «Паратунка» и «Хабаровск» показана на рис. 3.

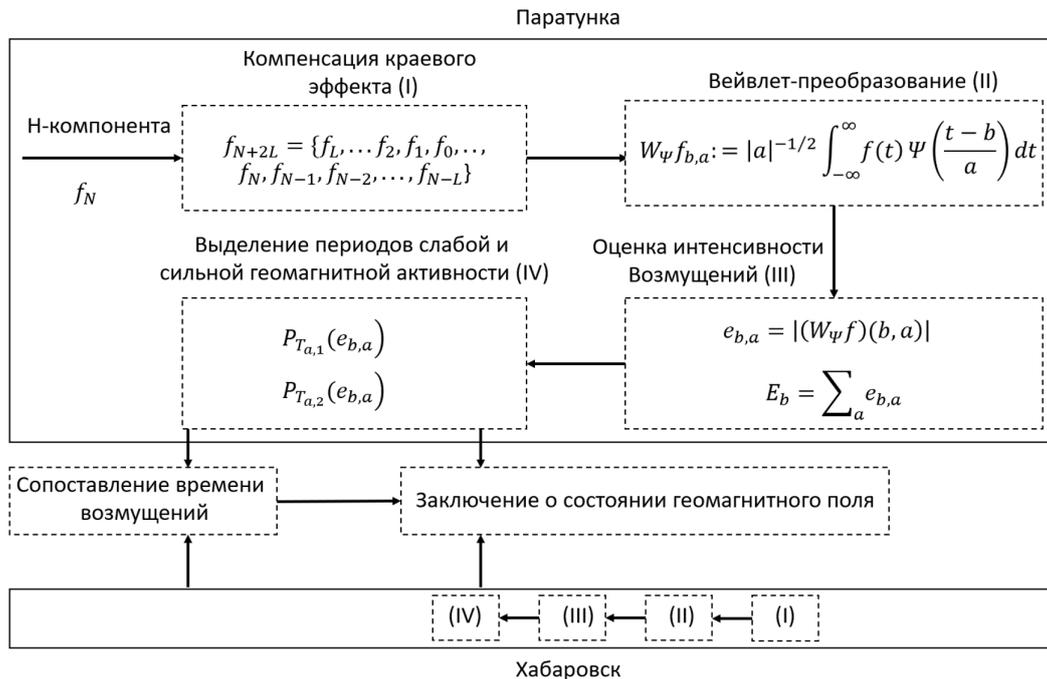


Рис. 3. Схема оценки состояния геомагнитных данных.
 [Figure 3. Geomagnetic data state estimation scheme.]

Результаты работы геомагнитной компоненты системы «Аврора»

Обработка магнитных данных в системе выполняется один раз в час. Дискретизация данных составляет одну минуту. Система предоставляет в текстовом виде результаты оценки состояния геомагнитного поля станции «Паратунка» (Камчатка) и «Хабаровск» за последние 24 часа.

Оперативный анализ

Оценка состояния геофизических полей за 24 часа от
 2018-12-25 13:42:00.000
 UTC

Состояние потока космических лучей: аномальное повышение интенсивности на станции Инувик

Состояние геомагнитного поля: спокойное (станция Паратунка), слабовозмущенное (станция Хабаровск)

Состояние ионосферы: слабые возмущения

Рис. 4. Результаты экспертной оценки состояния геомагнитного в системе «Аврора».

[Figure 4. Results of expert assessment of the geomagnetic state in the «Aurora» system.]

Формируемое системой заключение о состоянии поля (рис. 4) может принимать одно из следующих значений: спокойное (амплитуды возмущений соответствуют значениям К-индекса 0 и 1); слабовозмущенное (амплитуды возмущений соответствуют значениям К-индекса в интервале от 2-х до 3-х) и возмущенное (амплитуды возмущений соответствуют значениям К-индекса равным 4 и более).

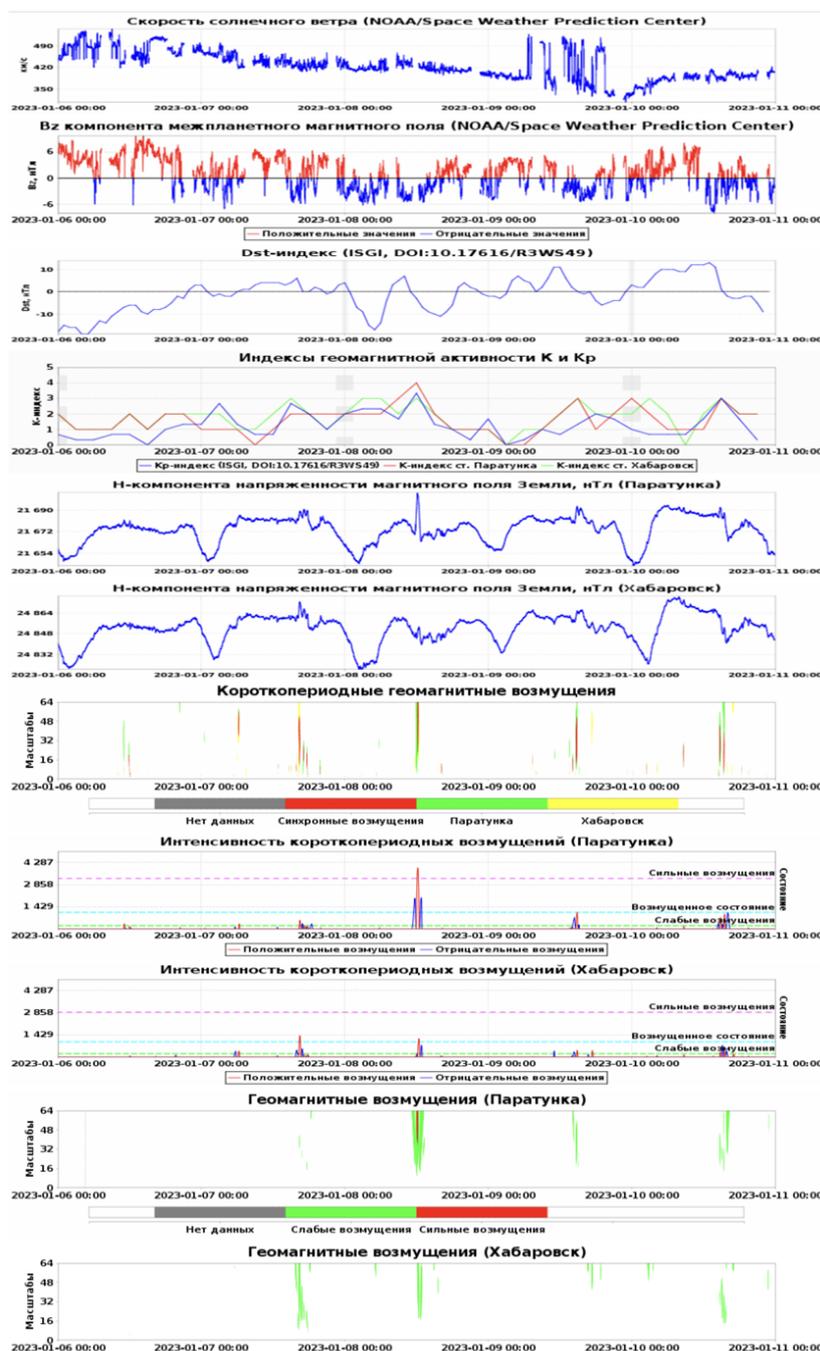


Рис. 5. Результаты работы геомагнитной компоненты системы «Аврора» в период 06–10 января 2023 г.

[Figure 5. Results of the geomagnetic component of the «Aurora» system for the period 06–10 January 2023.]

Визуальный анализ результатов обработки данных вариаций геомагнитного поля может быть выполнен в системе с помощью следующих данных (рис. 5):

- исходные минутные данные скорости солнечного ветра (NOAA, Space Weather Prediction Center);
- исходные минутные данные Vz-компоненты межпланетного магнитного поля (NOAA, Space Weather Prediction Center);
- исходные часовые данные Dst-индекса (International Service of Geomagnetic Indices);
- исходные трехчасовые данные Kp-индекса (International Service of Geomagnetic Indices);
- исходные минутные данные H-компоненты напряженности магнитного поля Земли станции «Паратунка» и станции Хабаровск;
- результаты выделения короткопериодных синхронных возмущений геомагнитного поля;
- результаты выделения слабых (амплитуды возмущений соответствуют значениям K-индекса в интервале от 2-х до 3-х) и сильных (амплитуды возмущений соответствуют значениям K-индекса, равным 4 и более) геомагнитных возмущений;
- результаты оценки интенсивности выделенных геомагнитных возмущений.

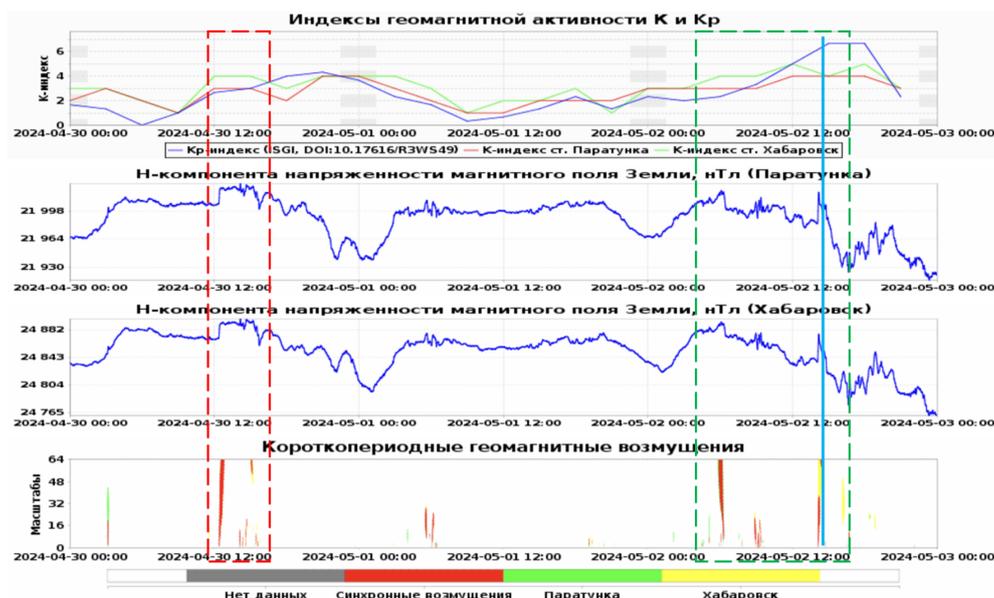


Рис. 6. Результаты работы системы «Аврора» в период 30 апреля – 02 мая 2024 г.
[Figure 6. «Aurora» system results for the period 30 April – 02 May 2024.]

В качестве примера работы системы, на рис. 6 приведены результаты обработки магнитных данных во время магнитной бури 02 мая 2024 г. По данным космической погоды (<http://ipg.geospace.ru/>) в начале описываемого периода 30 апреля в 11.// UTC пришел неоднородный ускоренный поток от выброса корональной массы (СМЕ от 27 апреля), концентрация протонов которого составила 27 частиц/см³, флуктуации южной компоненты усилились до $B_z = -10$ нТл, скорость солнечного ветра увеличилась до 420 км/сек. В течение часа после прихода СМЕ в исходных геомагнитных данных станций «Паратунка» и «Хабаровск» возникла бухтообразная особенность (рис. 6, красный прямоугольник). Результаты системы показывают в этот период возникновение синхронных короткопериодных возмущений на обеих анализируемых станциях, которые продолжались несколько часов. Значения Кр-индекса в это время возросли до 5, рассчитанные локальные индексы геомагнитной активности на станциях «Паратунка» и «Хабаровск» также подтверждают возникновение геомагнитных возмущений (рис. 6).

Далее, 02 мая в 13.// UTC пришел неоднородный ускоренный поток от выброса корональной массы (СМЕ от 01 мая), концентрация протонов которого составила 15 частиц/см³, флуктуации южной компоненты усилились до $B_z = -19$ нТл, скорость солнечного ветра начала возрастать и к 02.// UTC 03 мая достигла значения 510 км/сек (<http://ipg.geospace.ru/>). По данным <http://kakioka-jma.go.jp/> 02 мая 2024 г. в 14:07 UT началась геомагнитная буря (рис. 6, синяя вертикальная линия). После прихода СМЕ в системе на станциях «Паратунка» и «Хабаровск» выделены синхронные возмущения (рис. 6, зеленый прямоугольник). Особый интерес в задачах космической погоды имеют выделенные системой синхронные возмущения, произошедшие менее, чем за 12 часов до начала магнитной бури (рис. 6, зеленый прямоугольник). После начала магнитной бури система также показывает наличие возмущений в данных Н-компонент станций «Хабаровск» и «Паратунка» и возрастание локальных геомагнитных индексов (рис. 6).

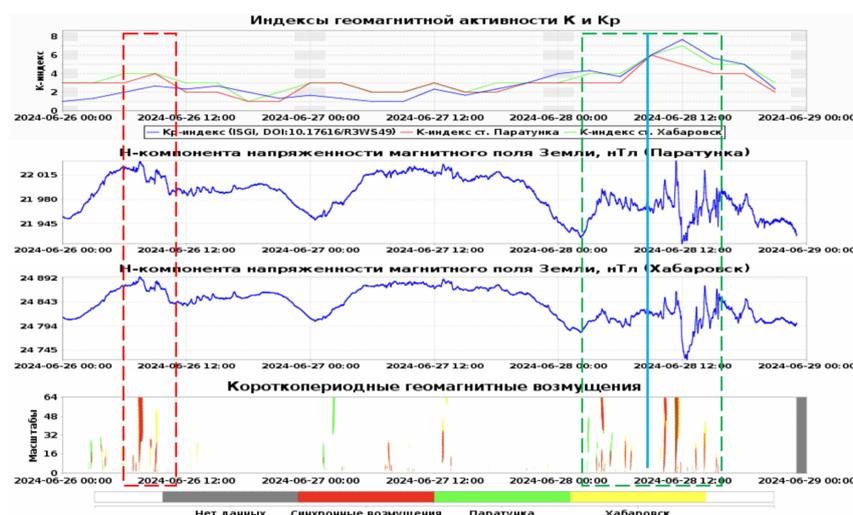


Рис. 7. Результаты работы системы «Аврора» в период 26-28 июня 2024 г.

[Figure 7. «Aurora» system results for the period 26-28 June 2024.]

На рис. 7 показаны результаты работы системы во время экстремальной магнитной бури, произошедшей 28 июня 2024 г. В анализируемый период 26 июня пришел неоднородный ускоренный поток от выброса корональной массы (СМЕ от 23 июня), скорость солнечного ветра увеличилась от 320 до 370 км/сек, южная компонента ММП флуктуировала от $B_z = -9$ нТл до $B_z = +11$ нТл (<http://ipg.geospace.ru/>). После прихода СМЕ система регистрирует яркие синхронные возмущения геомагнитного поля на обеих анализируемых станциях, в этот период значения локальных геомагнитных индексов не превышают значения 4 (рис. 7, красный прямоугольник).

Основное событие началось 28 июня 2024 г. в 10:12 UT (<http://kakioka-jma.go.jp/>), что отмечено на рис. 7 синей вертикальной линией. По данным <http://ipg.geospace.ru/> 28 июня в 08:// UTC пришел неоднородный ускоренный поток от корональной дыры (СІR), концентрация протонов которого составила 40 частиц/см³, флуктуации южной компоненты усилились до $B_z = -24$ нТл, скорость солнечного ветра начала увеличиваться и к 16:// UTC 28 июня достигла значения 500 км/сек. После прихода потока СІR системой зарегистрированы синхронные короткопериодные геомагнитные возмущения, локальные геомагнитные индексы превысили значение 7 (рис. 7, зеленый прямоугольник). Отметим, что накануне магнитной бури, за несколько часов до прихода потока СІR системой выделены короткопериодные возмущения на станции «Паратунка» и, с небольшой задержкой по времени, возмущения на станции «Хабаровск» (рис. 7, зеленый прямоугольник).

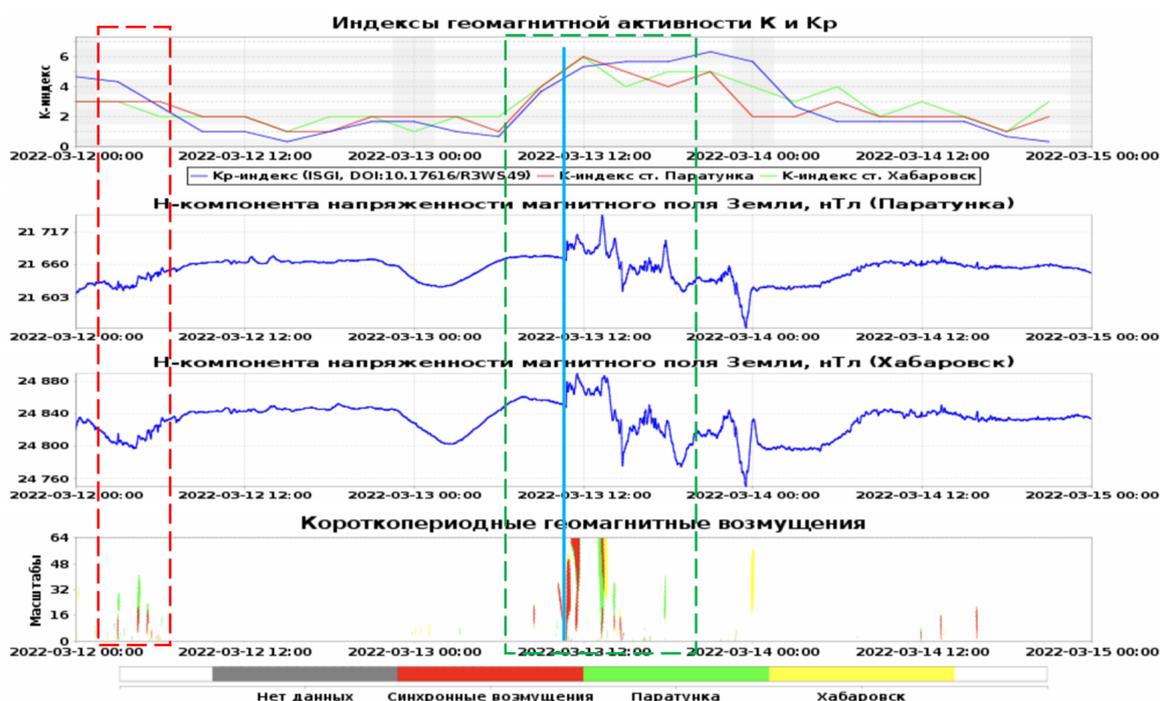


Рис. 8. Результаты работы системы «Аврора» в период 12-14 марта 2022 г.

[Figure 8. «Aurora» system results for the period 12-14 March 2022.]

На рис. 8 показана работа системы в период сильной магнитной бури с началом 13 марта 2022 в 10:45 UT (<http://kakioka-jma.go.jp/>). По данным космической погоды (<http://ipg.geosrsc.ru/>) накануне события 12 марта из-за влияния корональной дыры скорость солнечного ветра была в пределах от 380 км/сек до 410 км/сек, южная компонента флуктуировала от $B_z = -3$ нТл до $B_z = +3$ нТл. По результатам системы «Аврора» в это время наблюдается ряд слабых синхронных возмущений в геомагнитном поле (рис. 8, красный прямоугольник).

На следующий день 13 марта пришел неоднородный ускоренный поток от выброса корональной массы (СМЕ, сопровождавшее распад солнечного волокна 10 марта), концентрация протонов которого составила 44 частицы/см³, флуктуации южной компоненты усилились до $B_z = -24$ нТл, скорость солнечного ветра возросла до 600 км/сек (<http://kakioka-jma.go.jp/>). После начала магнитной бури (рис. 8, синяя вертикальная линия) системой зарегистрированы синхронные короткопериодные геомагнитные возмущения на обеих анализируемых станциях и произошло повышение геомагнитных индексов до значения 6 (рис. 8, зеленый прямоугольник). Накануне магнитной бури геомагнитная обстановка была спокойной, в этот период системой зарегистрировано слабое синхронное короткопериодное возмущение (рис. 8, зеленый прямоугольник).

Выводы

Геомагнитная компонента системы «Аврора» обеспечивает комплексную оценку состояния магнитного поля Земли в возмущенные и спокойные периоды. Накануне и в периоды магнитных бурь система позволяет на анализируемых станциях «Паратунка» и «Хабаровск» обнаружить синхронные короткопериодные геомагнитные возмущения. На примере рассмотренных в статье событий подтверждено, что результаты геомагнитной компоненты системы «Аврора» обеспечивают достоверную оценку состояния магнитного поля Земли и могут быть использованы в качестве дополнительного инструмента при выполнении оперативного прогноза космической погоды.

Список литературы

1. Singh A. K., Bhargawa A., Siingh D., Singh R. P. Physics of Space Weather Phenomena: A Review, *Geosciences*, 2021. vol. 11, pp. 286 DOI: 10.3390/geosciences11070286.
2. Despirak I. V., Kleimenova N. G., Gromova L. I., Gromov S. V., Malysheva L. M. Supersubstorms during Storms of September 7–8, 2017, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020. vol. 60, pp. 292–300 DOI: 10.1134/S0016793220030044.
3. Bailey R. L., Leonhardt R. Automated Detection of Geomagnetic Storms with Heightened Risk of GIC, *Earth, Planets and Space*, 2016. vol. 68, pp. 99 DOI: 10.1186/s40623-016-0477-2.
4. Mandrikova O. V. Application of the New Wavelet–Decomposition Method for the Analysis of Geomagnetic Data and Cosmic Ray Variations, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2021. vol. 61, pp. 492–507 DOI: 10.1134/S0016793221030117.
5. Mandrikova O. V., Stepanenko A. A. Automated method for calculating the Dst-index based on the wavelet model of geomagnetic field variations, *Computer Optics*, 2020. vol. 44, pp. 797–808 DOI: 10.18287/2412-6179-CO-709.
6. Gogatishvili I. M. Geomagnetic precursors of intense earthquakes in the spectrum of geomagnetic pulsations with frequencies of 1–0.02 Hz, *Geomagnetism and Aeronomy*, 1984. vol. 24, pp. 697–700.

7. Agayan S., Bogoutdinov S., Krasnoperov R., Sidorov R. Multiscale Approach to Geomagnetic Storm Morphology Analysis Based on DMA Activity Measures, *Applied Sciences*, 2021. vol. 11, pp. 12120 DOI: 10.3390/app112412120.
8. Zelinsky N.R.; Kleimenova N.G.; Gromova L.I. Applying the New Method of Time-Frequency Transforms to the Analysis of the Characteristics of Geomagnetic Pc5 Pulsations, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017. vol. 57, pp. 559–565 DOI: 10.1134/S0016793217050188.
9. Agayan S., Bogoutdinov S., Soloviev A., Sidorov R. The Study of Time Series Using the DMA Methods and Geophysical Applications, *Data Science Journal*, 2016. vol. 15, pp. 16 DOI: 10.5334/dsj-2016-016.
10. Rabie E., Hafez A. G., Saad O. M., El-Sayed A.–H. M., Abdelrahman K., Al–Otaibi N. Geomagnetic Micro-Pulsation Automatic Detection via Deep Learning Approach Guided with Discrete Wavelet Transform, *Journal of King Saud University — Science*, 2021. vol. 33, pp. 101263 DOI: 10.1016/j.jksus.2020.101263.
11. Хомутов С.Ю. Магнитные измерения на обсерваториях ИКИР ДВО РАН: от настоящего к будущему, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2022. Т. 41, №4, С. 209–224 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-209-224.
12. Chiaha S. O., Ugonabo O. J., Okpala K. C. A study on the effects of solar wind and interplanetary magnetic field on geomagnetic H–component during geomagnetic storms, *International Journal of Physical Sciences*, 2019. vol. 14, no. 5, pp. 38–44 DOI: 10.5897/IJPS2018.4772.
13. Mandrikova O., Polozov Y., Khomutov S. Wavelet Model of Geomagnetic Field Variations and Its Application to Detect Short–Period Geomagnetic Anomalies, *Applied Sciences*, 2022. vol. 12, pp. 2072 DOI: 10.3390/app12042072.
14. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. San Diego: Academic Press, 1999. 620 pp.
15. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 357 pp.

Информация об авторах



Полозов Юрий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории Системного анализа, ИКИР ДВО РАН, Россия,  ORCID 0000-0001-6960-8784.



Мандрикова Оксана Викторовна – доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией Системного анализа, ИКИР ДВО РАН, Россия,  ORCID 0000-0002-6172-1827.

References

- [1] Singh A. K., et. al. Physics of Space Weather Phenomena: A Review, Geosci., 2021, vol. 11, 286. DOI: 10.3390/geosciences11070286
- [2] Despirak I. V., et. al. Supersubstorms during Storms of September 7–8, 2017, Geomagnetism and Aeronomy, 2020, vol. 60, pp. 292–300 DOI: 10.1134/S0016793220030044
- [3] Bailey R. L., Leonhardt R. Automated Detection of Geomagnetic Storms with Heightened Risk of GIC, Earth, Planets and Space, 2016, vol. 68, p. 99 DOI: 10.1186/s40623-016-0477-2
- [4] Mandrikova O. V. Application of the New Wavelet–Decomposition Method for the Analysis of Geomagnetic Data and Cosmic Ray Variations, Geomagnetism and Aeronomy, 2021, vol. 61, pp. 492–507. DOI: 10.1134/S0016793221030117
- [5] Mandrikova O. V., Stepanenko A. A. Automated method for calculating the Dst-index based on the wavelet model of geomagnetic field variations, Computer Optics, 2020, vol. 44, pp. 797–808. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-709
- [6] Gogatishvili I.M Geomagnetic precursors of intense earthquakes in the spectrum of geomagnetic pulsations with frequencies of 1–0.02 Hz, Geomag. and Aeron., 1984, vol. 24, P. 697–700.
- [7] Agayan S., Bogoutdinov S., Krasnoperov R., Sidorov R. Multiscale Approach to Geomagnetic Storm Morphology Analysis Based on DMA Activity Measures, Applied Sciences, 2021, vol. 11, p. 12120. DOI: 10.3390/app112412120
- [8] Zelinsky N. R., Kleimenova N. G., Gromova L. I. Applying the New Method of Time-Frequency Transforms to the Analysis of the Characteristics of Geomagnetic Pc5 Pulsations. Geomag. and Aeron., 2017, vol. 57, P. 559–565. DOI: 10.1134/S0016793217050188
- [9] Agayan S., et. al. The Study of Time Series Using the DMA Methods and Geophysical Applications, Data Science Journal, 2016, vol. 15, 16. DOI: 10.5334/dsj-2016-016
- [10] Rabie E., Hafez A. G., Saad O. M., El-Sayed A.–H. M., Abdelrahman K., Al–Otaibi N. Geomagnetic Micro–Pulsation Automatic Detection via Deep Learning Approach Guided with Discrete Wavelet Transform, Journal of King Saud University – Science, 2021, vol. 33, p. 101263. DOI: 10.1016/j.jksus.2020.101263
- [11] Khomutov S. Y. Magnetic measurements at observatories of IKIR FEB RAS: from the present to the future, Vestnik KRAUNC. Fiz.-Mat. Nauki, 2022, 41, no. 3, pp. 209–224. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-209-224 (In Russian)
- [12] Chiaha S. O., Ugonabo O. J., Okpala K. C. A study on the effects of solar wind and interplanetary magnetic field on geomagnetic H–component during geomagnetic storms, Inter. Jour. of Phys. Sci., 2019, vol.14, no. 5, pp. 38–44. DOI: 10.5897/IJPS2018.4772
- [13] Mandrikova O., Polozov Y., Khomutov S. Wavelet Model of Geomagnetic Field Variations and Its Application to Detect Short–Period Geomagnetic Anomalies, Applied Sciences, 2022, vol. 12, p. 2072. DOI: 10.3390/app12042072
- [14] Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing. San Diego, Academic Press, 1999, 620 p.
- [15] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992, 357 p.

Information about the authors



Yurii Alexandrovich Polozov – Ph. D. (Tech.), Senior Researcher Laboratory of System Analysis, IKIR FEB RAS, Russia,  ORCID 0000-0001-6960-8784.



Mandrikova Oksana Viktorovna – D. Sci. (Tech.), Professor, Head Laboratory of System Analysis, IKIR FEB RAS, Russia,  ORCID 0000-0002-6172-1827.



Анализ динамики ионосферных параметров в возмущенные периоды по результатам работы системы «Аврора»

*Н. В. Фетисова**, *О. В. Мандрикова**

Институт космических исследований и распространения радиоволн
ДВО РАН, 684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная 7

Аннотация. В работе описана ионосферная компонента интерактивной системы «Аврора». В системе «Аврора» реализованы новые методы анализа данных, основанные на синтезе современных средств цифровой обработки сигналов с классическими методами анализа данных. Ионосферная компонента системы «Аврора» выполняет обработку и анализ параметров критической частоты ионосферы foF2, регистрируемых на станции «Паратунка» (Камчатский край), и формирует заключение о состоянии ионосферы над Камчаткой. Данная разработка выполнена коллективом лаборатории системного анализа ИКИР ДВО РАН. В статье представлены реализованные в системе численные алгоритмы и показаны результаты работы системы в периоды повышенной геомагнитной активности и сейсмических процессов на Камчатке.

Ключевые слова: ионосферные возмущения, вейвлет-преобразование, авторегрессионные модели

Получение: XX.11.2024; Исправление: XX.11.2024; Принятие: XX.11.2024; Публикация онлайн: XX.11.2024

Для цитирования. Фетисова Н. В., Мандрикова О. В. Анализ динамики ионосферных параметров в возмущенные периоды по результатам работы системы «Аврора» // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 94-107. EDN: RTKSCP. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-94-107>.

Финансирование. Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № НИОКТР 124012300245-2).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

***Корреспонденция:**  E-mail: nv.glushkova@yandex.ru, oksanam1@mail.ru,

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Фетисова Н. В., Мандрикова О. В., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)





Analysis of the Ionospheric Parameter Dynamics During Disturbed Periods Based on Aurora System Results

*N. V. Fetisova**, *O. V. Mandrikova**

Institute of Cosmophysical Research and Radiowave Propagation FEB RAS,
684034, Kamchatka region, Paratunka, Mirnaya Str.7

Abstract. The paper describes an ionospheric component of “Aurora” interactive system. The “Aurora” system implements new methods of data analysis based on the combination of modern means of digital signal processing with classical methods of data analysis. The ionospheric component of “Aurora” system performs processing and analysis of the foF2 ionospheric critical frequency parameters recorded at Paratunka station (Kamchatka Territory) and forms a conclusion on the state of the ionosphere above Kamchatka. This development was carried out by a team of the system analysis laboratory of IKIR FEB RAS. The paper presents numerical algorithms implemented in the system and results system during increased geomagnetic activity and seismic processes in Kamchatka.

Key words: ionospheric disturbances, wavelet transform, autoregressive models

Received: XX.11.2024; Revised: XX.11.2024; Accepted: XX.11.2024; First online: XX.11.2024

For citation. Fetisova N.V., Mandrikova O.V. Analysis of the ionospheric parameter dynamics during disturbed periods based on Aurora system results. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 94-107. EDN: RTKSCP. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-94-107>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (Reg. No. NIOKTR 124012300245-2).

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. Author is solely responsible for providing the final version of the article in print.

*Correspondence:  E-mail: nv.glushkova@yandex.ru, oksanam1@mail.ru,

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Fetisova N. V., Mandrikova O. V., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Работа направлена на решение задач мониторинга и прогноза состояния ионосферы. Состояние ионосферы является одним из важных факторов космической погоды. Актуальность и прикладная значимость исследования обусловлена зависимостью бесперебойной работы современных технических систем от состояния ионосферы [1]– [3]. Известно, что вследствие естественного воздействия (солнечные события, геомагнитные бури, сейсмические события и др.) в ионосфере формируются возмущения [2]– [7], которые оказывают негативное влияние на работу ГНСС, а также на качество и надежность радиосвязи [2, 3, 8]. Ионосферные возмущения возникают в периоды значительного изменения (повышение/понижение) электронной концентрации относительно фонового (спокойного) уровня [2]– [5], [9]– [11]. В регистрируемых параметрах ионосферы (например, foF2, ПЭС) они могут проявляться в виде аномального повышения либо понижения уровня вариаций и иметь как кратковременный, так и длительный характер. Наблюдаемые аномальные изменения имеют в регистрируемых данных разную амплитуду и форму и часто наблюдаются в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь [12, 13]. Разработанные научными группами средства анализа динамики параметров ионосферы основаны на разных подходах – эмпирическая международная модель ИРИ [14], программный комплекс глобального детектирования Globdet [1], ассимиляционная модель АМИ [15], глобальная физическая модель SAMI3 [16], нейросетевая модель - operational forecasting model [2]. Однако, как правило, данные методы используют большое количество входных геофизических параметров, что влияет на эффективность и точность результатов обработки, а также на возможность реализации их работы в оперативном режиме.

В данной работе представлена разработанная в лаборатории системного анализа ИКИР ДВО РАН *ионосферная компонента* интерактивной системы комплексного анализа геофизических параметров «Аврора» (система входит в Common Use Center «North-Eastern Heliogeophysical Center» СКР-558279 ИКИР ДВО РАН). С 2018 г. система «Аврора» выполняет оценку состояния ионосферы над Камчаткой. В анализе используются данные критической частоты ионосферы foF2 (ст. Паратунка, Камчатский край). Результаты обработки данных представляются в графическом виде в открытом доступе на сайте ИКИР ДВО РАН <http://lsaoperanalysis.ikir.ru/lsaoperanalysis.html>. На основе полученных результатов в системе генерируется заключение о состоянии ионосферы за последние 24 ч. В основе *ионосферной компоненты* системы «Аврора» лежит разработанная авторами обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы (ОМКМ) и основанные на ней численные алгоритмы [12, 13, 17, 18]. При построении ОМКМ применялось сочетание методов вейвлет-анализа с авторегрессионными моделями и пороговыми функциями [17, 18]. В системе, по мере поступления данных, выполняется моделирование и анализ часовых и 15-минутных результатов измерений вариаций foF2 ст. Паратунка (52.97° N; 158.24° E, Камчатка, ИКИР ДВО РАН). Анализ выполняется с учетом суточно-

сезонных изменений и уровня солнечной активности [17, 18]. Система позволяет в оперативном режиме обнаруживать ионосферные аномалии и оценивать их параметры (интенсивность, длительность и момент возникновения). В данном исследовании представлены результаты работы *ионосферной компоненты* на примере анализа вариаций foF2 в периоды магнитной бури от 15 июня 2024 г. и сейсмического события от 2 ноября 2018 г. На примере рассмотренных событий показана эффективность системы «Аврора» и перспективность её применения для решения задач космической погоды.

Описание метода

Методика обработки и анализа ионосферных параметров в системе «Аврора»

Разработанная авторами ОМКМ описывает временной ход параметров ионосферы и имеет следующий аналитический вид [17, 18]:

$$f(t) = \sum_k s_{-3,k}^1 \varphi_{-3,k}(t) + \sum_k s_{-3,k}^2 \Psi_{-3,k}(t) + \sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{dist}}(t) + e(t), \quad (1)$$

где $s_{-3,k}^\mu$ ($\mu = 1, 2$) – оценочное значение μ -й компоненты, описывающей регулярные периодические вариации параметров ионосферы:

$$s_{-3,k}^\mu = \sum_{l=1}^{p_{-3}^\mu} \gamma_{-3,l}^\mu \omega_{-3,k-l}^\mu + a_{-3,k}^\mu, \quad (2)$$

где $\gamma_{-3,l}^\mu$, p_{-3}^μ – параметры и порядок АР-модели [19], $\omega_{-3,k}^1 = \nabla c_{-3,k}$, $\omega_{-3,k}^2 = \nabla d_{-3,k}$ – 1-я разность вейвлет-коэффициентов $c_{-3,k}$ и $d_{-3,k}$ [20], $a_{-3,k}^\mu$ – остаточные ошибки, $\varphi_{-3,k}$ – масштабирующая функция, $\Psi_{-3,k}$ – вейвлет, $m = -3$ – уровень вейвлет-разложения (оценивался на основе алгоритма [18]), k – параметр времени.

Компоненты $\sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{dist}}(t)$ модели (1) описывают временной ход параметров ионосферы в периоды аномальных изменений данных (аномальные повышения или понижения электронной концентрации). Ввиду разной формы и длительности ионосферных аномалий, они определяются через пороговые функции $\sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{dist}}(t) = \sum_{\eta,n} P_{\eta,n}^i(d_{\eta,n}) \Psi_{\eta,n}(t)$ ($i = 1, 2, 3$):

$$P_{\eta,n}^i(d_{\eta,n}) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} d_{\eta,n}^{1+}, \text{ если } P_{\eta,n}^1 < (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) \leq P_{\eta,n}^2 \\ 0, \text{ если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}| < P_{\eta,n}^1 \text{ or } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}| > P_{\eta,n}^2 \\ d_{\eta,n}^{1-}, \text{ если } -P_{\eta,n}^2 < (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) \leq -P_{\eta,n}^1 \end{array} \right. , \\ \left\{ \begin{array}{l} d_{\eta,n}^{2+}, \text{ если } P_{\eta,n}^2 < (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) \leq P_{\eta,n}^3 \\ 0, \text{ если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}| < P_{\eta,n}^2 \text{ or } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}| > P_{\eta,n}^3 \\ d_{\eta,n}^{2-}, \text{ если } -P_{\eta,n}^3 \leq (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) < -P_{\eta,n}^2 \end{array} \right. , \\ \left\{ \begin{array}{l} d_{\eta,n}^{3+}, \text{ если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) > P_{\eta,n}^3 \\ 0, \text{ если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}| < P_{\eta,n}^3 \\ d_{\eta,n}^{3-}, \text{ если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) < -P_{\eta,n}^3 \end{array} \right. , \end{cases} \quad (3)$$

где $d_{\eta,n} = \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты, Ψ – вейвлет, η – параметр масштаба, n – параметр времени, $\langle \cdot \rangle$ – скалярное произведение, пороги $P_{\eta,n}^i = V^i \sqrt{\frac{1}{\Phi-1} \sum_{n=1}^{\Phi} (d_{\eta,n} - \bar{d}_{\eta,n})^2}$, где $d_{\eta,n}^{med}$ и $\bar{d}_{\eta,n}$ – медиана и среднее значение, соответственно, верхний индекс $i = 1 \pm; 2 \pm; 3 \pm$ определяет положительные и отрицательные аномалии трех классов: 1 класс – малой интенсивности, 2 класс – умеренной интенсивности, 3 класс – большой интенсивности.

Составляющая $e(t)$ модели описывает природные и техногенные шумы (аппаратные сбои, промышленные взрывы и др.).

Обнаружение и оценка параметров ионосферных аномалий выполняется с использованием численных алгоритмов, основанных на модели (1) [12,13]. В основе алгоритма обнаружения интенсивных ионосферных аномалий лежит анализ остаточных ошибок регулярных компонент модели (1) (см. соотн. (2)). Алгоритм включает операции, представленные на рис. 1.

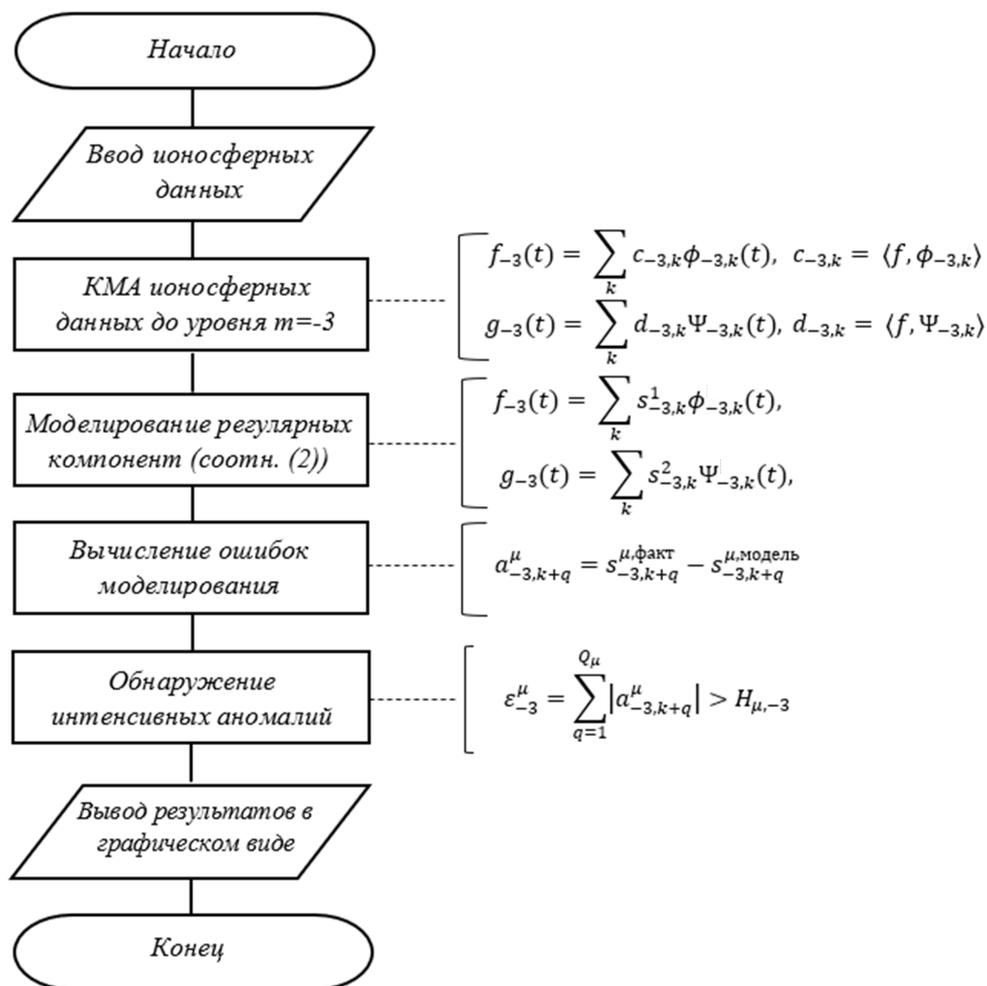


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обнаружения интенсивных ионосферных аномалий [Figure 1. Flowchart of the algorithm for detection of intensive ionospheric anomalies]

Используются параметры моделей регулярных компонент и пороговые значения $H_{m,-3}$, оцененные априори по данным foF2 ст. Паратунка [18].

Операции обнаружения и оценки параметров *внезапных ионосферных аномалий* основаны на аномальной компоненте $\sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{dist}}(t)$ модели (1) (см. соотн. (3)). Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

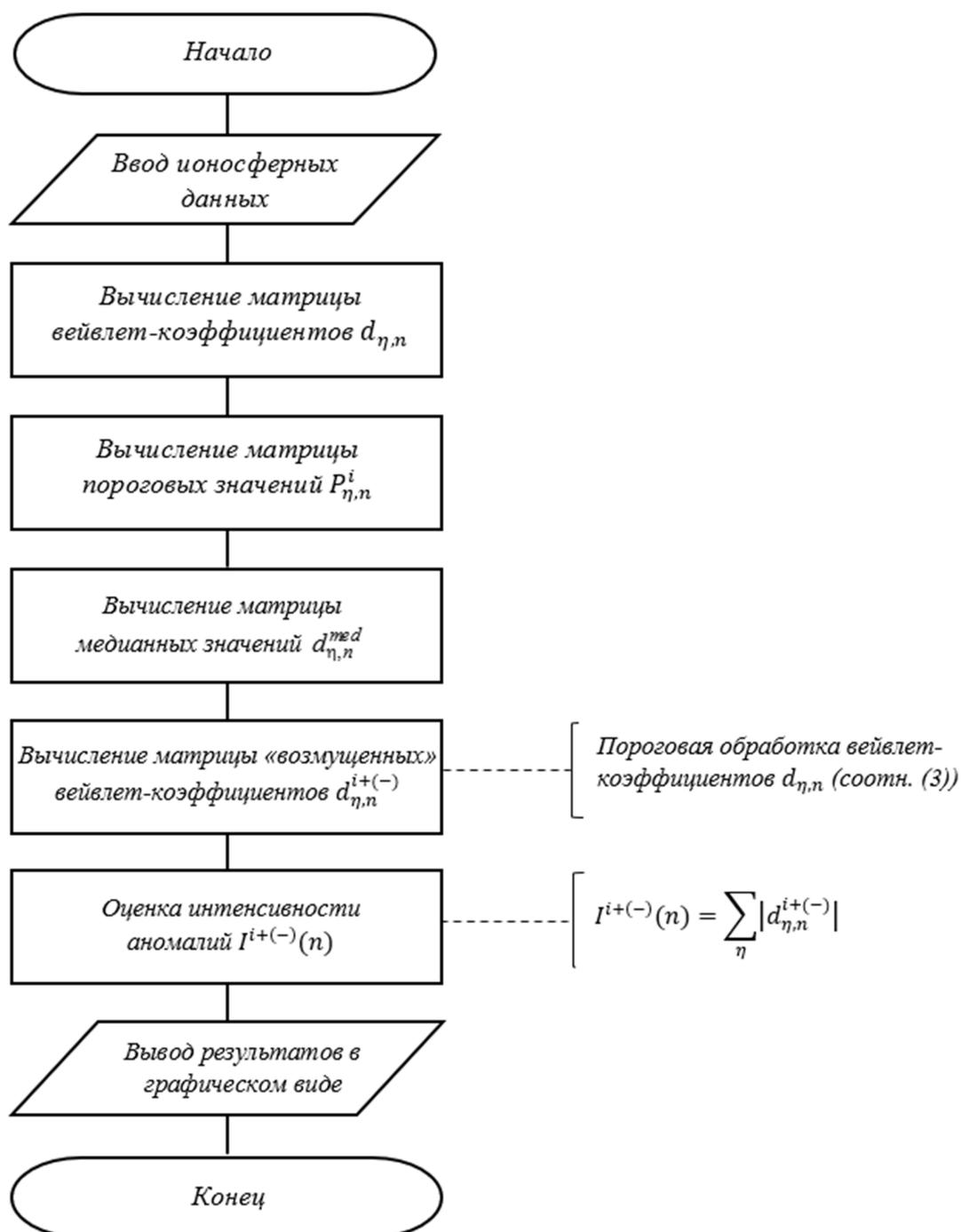


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обнаружения внезапных ионосферных аномалий
[Figure 2. Flowchart of the algorithm for detection of sudden ionospheric anomalies]

Пороги $P_{n,n}^i$ оценивались по данным foF2 ст. Паратунка путем минимизации апостериорного риска [21].

Результаты работы ионосферной компоненты системы «Аврора»

В разделе представлены результаты работы *ионосферной компоненты* системы «Аврора» в периоды магнитной бури от 15 июня 2024 г. (рис. 3 а-е) и сейсмического события от 2 ноября 2018 г. (рис. 4 а-д). Параметры реализующих алгоритмов в системе «Аврора» настраивались по данным foF2 ст. «Паратунка» (52.97° N; 158.24° E) и выполнялась их адаптация под уровень солнечной активности (максимум/минимум) и сезон (зима/лето) [18]. Результаты работы алгоритма обнаружения внезапных ионосферных аномалий представлены на рис. 3 в, г, 4 б, в (красным/синим цветом отмечены положительные/отрицательные аномалии, характеризующие повышение/понижение электронной концентрации). Результаты работы алгоритма обнаружения интенсивных аномалий представлены на рис. 3 д, е, 4 г, д.

Заключение о состоянии ионосферы в системе может иметь одно из следующих возможных значений: спокойное, слабые возмущения, возмущенное состояние и сильные возмущения (например, рис. 3 а). Для интерпретации результатов работы системы используются параметры магнитосферы (рис. 3 ж,з, рис. 4 е, ж) и солнечного ветра (рис. 3 и,к, рис. 4 з, и) (ресурс: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>, <https://ipg.geospace.ru>). Сейсмическая активность анализировалась по данным каталога землетрясений Камчатского филиала Единой Геофизической службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН, <https://sdis.emsd.ru/main.php>).

На рис. 3 представлен результат работы системы в период слабой магнитной бури, начавшейся 15 июня 2024 г. ($\min Dst = -28$ нТл, момент начала бури отмечен вертикальным пунктиром). Предбуревый период характеризуется относительно спокойным состоянием геомагнитного поля (К-индекс не превышал значения 3, рис. 3 ж), скорость солнечного ветра составляла 320-370 км/сек (рис. 3 к), южная компонента ММП флуктуировала от $V_z = -5$ нТл до $V_z = +7$ нТл (<https://ipg.geospace.ru>).

В этот период по результатам работы системы «Аврора» в ионосфере возникла положительная аномалия длительностью около 22 ч. (рис. 3 в, г). Выделенная аномалия имела высокую интенсивность с максимумом в период возрастания К-индекса с 2 на 3 (рис. 3 г, ж). Отметим, что 13 июня в 5.30 UTC на расстоянии 587.6 км от станции регистрации foF2 (координаты землетрясения: 55.49° N; 162.96° E) произошло землетрясение, которое имело магнитуду $M = 5.75$ и глубину 62.3 км.

Интенсивная реакция ионосферы на слабые геомагнитные возмущения возможно обусловлена данным сейсмическим событием, которое привело к более значительному росту электронной концентрации. Превышение ошибок сглаженной компоненты $f_{-3}(t)$ 70% и 90% доверительных интервалов, которое составило 2.5

СО и 1.4 СО, соответственно, также указывает на наличие аномальных процессов в ионосфере (рис. 3 д).

Во время наиболее сильных геомагнитных возмущений результаты системы «Аврора» показывают понижение электронной концентрации в ионосфере, что далее привело к формированию отрицательной аномалии высокой интенсивности (рис. 3 в, г). В этот период, по данным ОМКМ, максимальное превышение ошибок компоненты $f_{-3}(t)$ 70% и 90% доверительных интервалов составило 2.5 СО и 1.4 СО, соответственно (рис. 3 д).

Понижение электронной концентрации протекало на фоне прихода 15 июня в 11. UTC неоднородного ускоренного потока от СМЕ от 12 июня, усиления флуктуации Vz-компоненты до -14 нТл, возрастания скорости солнечного ветра до 490 км/сек (<https://ipg.geospace.ru>). В этот период К-индекс возрос до 5 (рис. 3 ж).

Восстановительная фаза магнитной бури сопровождалась колебательными процессами в ионосфере (от фонового уровня до слабой интенсивности), которые формировались на фоне прихода 16 июня в 16. UTC неоднородного ускоренный поток от С1R и 17 июня в 13. UTC от С1R и СМЕ (от 13 июня). Реакция ионосферы на анализируемую магнитную бурю имеет схожий характер с результатами, представленными в более ранних работах авторов [18, 22].

На рис. 4 представлены результаты работы системы «Аврора» по обработке данных $foF2$ в период сейсмического события от 2 ноября 2018 г. По данным сейсмического каталога <https://sdis.emsd.ru/main.php> землетрясение произошло на расстоянии 115.48 км от станции регистрации $foF2$ (координаты землетрясения: 51.98° N; 158.72° E) в 9:39 UTC, имело магнитуду $M = 5.8$ и глубину 72.4 км. В анализируемый период с 29 октября до 4 ноября геомагнитное поле было спокойным (значения К-индекса не превышают 2, рис. 4 е), скорость солнечного ветра не превышала 350 км/с (рис. 4 и), южная компонента ММП флуктуировала от $V_z = \pm 2$ нТл до $V_z = \pm 4$ нТл (<https://ipg.geospace.ru>).

По результатам работы системы «Аврора» за 2.5 суток до землетрясения электронная концентрация в ионосфере начала понижаться, что привело к формированию отрицательной аномалии умеренной интенсивности (рис. 4 б, в). Выделенная аномалия достигла максимальной интенсивности 31 октября около 13:00 UTC и имела длительность около суток. Далее 1 ноября отрицательная аномалия сменилась на положительную аномалию умеренной интенсивности, которая имела длительность около 26 ч. (рис. 4 б, в).

Повышение электронной концентрации привело к изменению временного хода $foF2$, что подтверждается превышением ошибок компоненты $f_{-3}(t)$ 70% и 90% доверительных интервалов (отклонения составили 2.2 СО и 1.45 СО соответственно, рис. 4 г), а также отклонением значений $foF2$ от медианы (рис. 4 а). Период после землетрясения сопровождался в ионосфере колебательными процессами фонового уровня. Сопоставление динамики иносферных параметров с параметрами околоземного космического пространства и магнитосферы указывает на возможную связь выделенных аномалий с сейсмическими процессами.

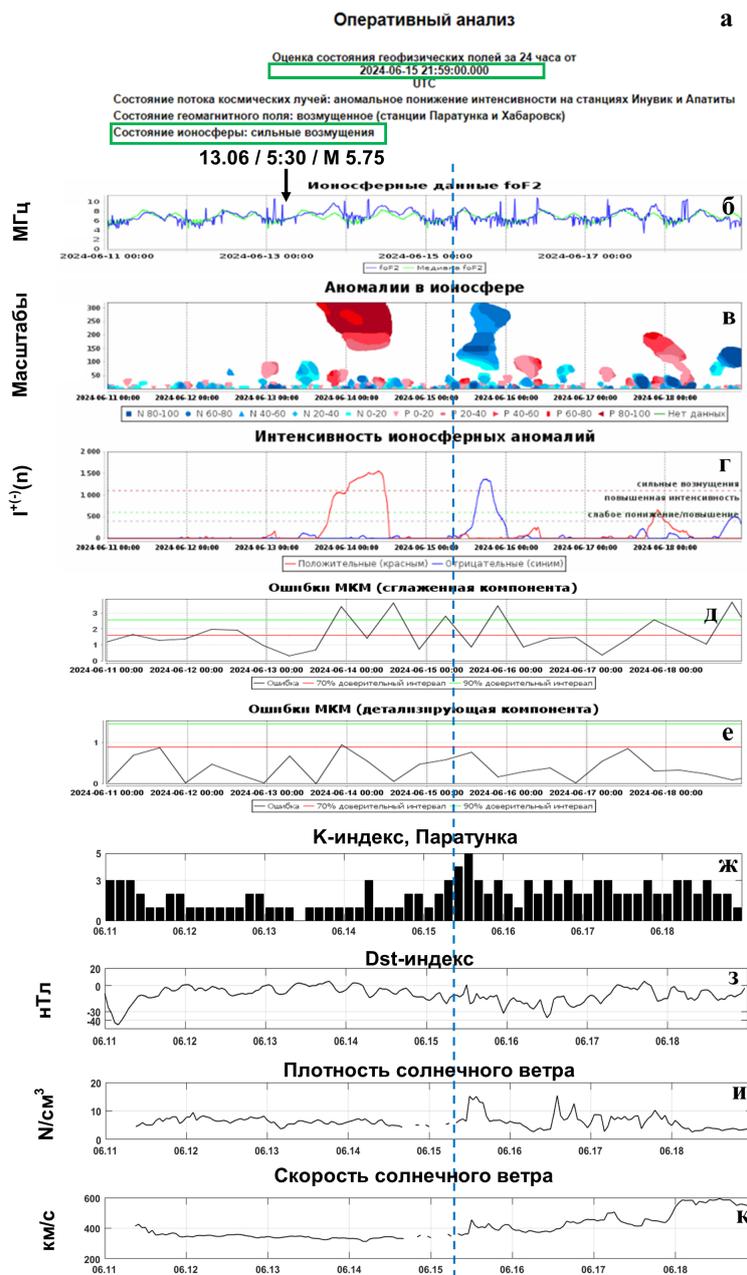


Рис. 3. Результаты работы системы «Аврора» в период слабой магнитной бури 15 июня 2024 г (а-е): а) – заключение о состоянии ионосферы на 15.06.2024, б) – данные foF2 (синим), медиана foF2 (зеленым), в), г) – выделенные ионосферные аномалии и их интенсивность (красным и синим цветом отмечены положительные и отрицательные аномалии, соответственно), д), е) – ошибки регулярных компонент и их доверительные интервалы. Вертикальный пунктир – начало магнитной бури

[Figure 3. Aurora system results during the weak magnetic storm on June 15, 2024 (a-f): a) conclusion on the ionosphere state at 15.06.2024, b) foF2 data (blue), 27-day median (green), c), d) detected positive (red) and negative (blue) ionospheric anomalies, e), f) regular component errors and their confidence intervals. The vertical dotted line is the beginning of the magnetic storm]

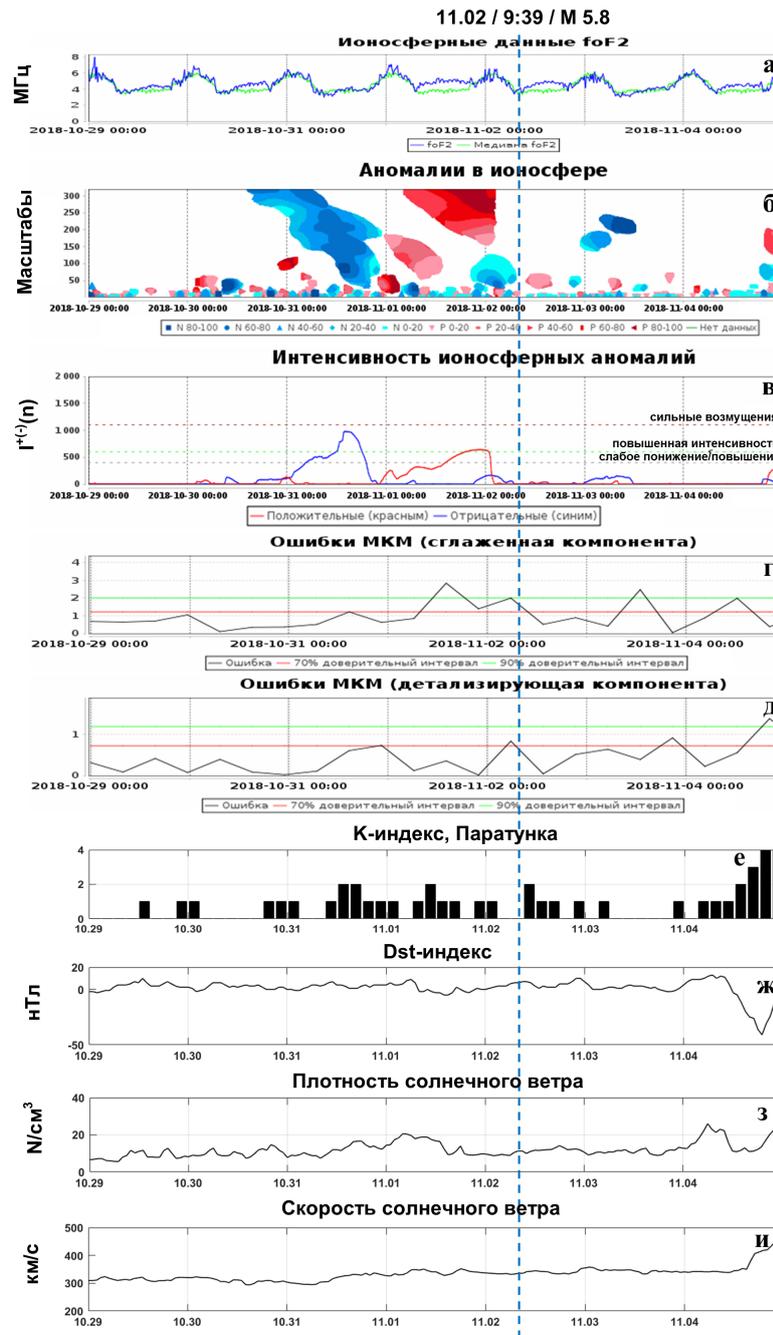


Рис. 4. Результаты работы системы «Аврора» в период землетрясения 2 ноября 2018 г (а-д): а) – данные foF2 (синим), медиана foF2 (зеленым), б), в) – выделенные ионосферные аномалии и их интенсивность, красным и синим цветом отмечены положительные и отрицательные аномалии, соответственно, г), д) – ошибки регулярных компонент и их доверительные интервалы. Вертикальный пунктир – начало землетрясения

[Figure 4. Aurora system results during the earthquake on November 2, 2018: (a-e): a) foF2 data (blue), 27-day median (green), b), c) detected positive (red) and negative (blue) ionospheric anomalies, d), e) regular component errors and their confidence intervals. The vertical dotted line is the beginning of the earthquake]

Заключение

На примере слабой магнитной бури, произошедшей 15 июня 2024 г., подтверждена сложная динамика ионосферных параметров в периоды повышенной солнечной и геомагнитной активностей. Накануне рассмотренного события выделена продолжительная положительная ионосферная аномалия, во время наиболее сильных геомагнитных возмущений электронная концентрация в ионосфере понизилась и сформировалась отрицательная аномалия высокой интенсивности. Реакция ионосферы на анализируемую магнитную бурю имеет схожий характер с результатами, представленными в более ранних работах авторов [18, 22], и согласуется с результатами других исследователей [2, 4, 5, 9]. Анализ динамики ионосферных параметров в период рассмотренного сейсмического события 2 ноября 2018 г. показал возможность возникновения ионосферных возмущений во время сейсмических процессов на Камчатке. Выделенные аномальные изменения характеризовались как повышением, так и понижением электронной концентрации. Результаты работы подтвердили эффективность интерактивной системы «Аврора» для задач космической погоды и показали возможность её применения для изучения динамики параметров ионосферы в возмущенные периоды.

Благодарность. Авторы выражают благодарность институтам, выполняющим регистрацию данных, которые использовались в работе.

Список литературы

1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: ГУ НУ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
2. Nakamura M., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan, *J. Natl. Inst. Inf. Commun. Technol.*, 2009. vol. 56, pp. 391–406.
3. Tsagouri I. Space weather effects on the Earth's Upper Atmosphere: short report on ionospheric storm effects at middle latitudes, *Atmosphere*, 2022. vol. 13, no. 2, pp. 346 DOI: 10.3390/atmos13020346.
4. Danilov A. D. Detailed analysis of the behavior of the F2-layer critical frequency prior to geomagnetic storms, *Adv. Space Res.*, 2022. vol. 70, no. 4, pp. 1078–1088 DOI: 10.1016/j.asr.2022.05.025.
5. Danilov A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances, *Adv. Space Res.*, 2013. vol. 52, no. 3, pp. 343–366.
6. Pulinets S. A., Legen'ka A. D., Hegai V. V., Kim V. P., Korsunova L. P. Ionosphere disturbances preceding earthquakes according to the data of ground based station of vertical ionospheric sounding Wakkanai, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018. vol. 58, no. 5, pp. 686–692.
7. Rodkin M. V., Liperovskaya E. V. On the difference in physical mechanisms of earthquakes at different depths and their ionospheric response, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2023. vol. 59, pp. 377–390 DOI: 10.1134/s1069351323030114.
8. Priyadarshi S. A review of ionospheric scintillation models, *Surveys in Geophysics*, 2015. vol. 36, no. 2, pp. 295–324 DOI: 10.1007/s10712-015-9319-1.
9. Joshua B. W., Adeniyi J. O., Amory-Mazaudier C., Adebisi S. J. On the Pre-Magnetic Storm Signatures in NmF2 in Some Equatorial, Low and Mid-Latitude Stations, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2021. vol. 126, pp. e2021JA029459 DOI: 10.1029/2021JA029459.
10. Kumar V. V., Parkinson M. L. A global scale picture of ionospheric peak electron density changes during geomagnetic storms, *Space Weather*, 2017. vol. 15, pp. 637–652 DOI: 10.1002/2016SW001573.
11. Mansilla G. A., Zossi M. M. Longitudinal variation of the ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm at equatorial/low latitudes, *Pure Appl. Geophys*, 2020. vol. 177, pp. 5833–5844 DOI: 10.1007/s00024-020-02601-1.

12. Фетисова Н. В Алгоритм выделения интенсивных аномальных изменений во временном ходе параметров ионосферы, *Компьютерная оптика*, 2019. Т. 43, № 6, С. 1064–1071 DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1064-1071.
13. Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Yu. Method of ionospheric parameter analysis in the problems of real-time data processing, *J. Phys. Conference Series by IOP Publishing*, 2018. vol. 1096, pp. 012091 DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012091.
14. Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., Altadill D., Reinisch B. W., Pignalberi A. The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark, *Reviews of Geophysics*, 2022. vol. 60, no. 4, pp. e2022RG000792 DOI: 10.1029/2022RG000792.
15. Solomentsev D. V., Titov A. A., Khattatov B. V. Three-dimensional assimilation model of the ionosphere for the European region, *Geomagn. Aeron.*, 2013. vol. 53, no. 1, pp. 73–84 DOI: 10.1134/S0016793212060114.
16. Huba J. D., Liu H. L. Global modeling of equatorial spread F with SAMI3/WACCM-X, *Geophysical Research Letters*, 2020. vol. 47, no. 14, pp. e2020GL088258 DOI: 10.1029/2020GL088258.
17. Mandrikova O, Fetisova N, Polozov Y. Hybrid Model for Time Series of Complex Structure with ARIMA Components, *Mathematics*, 2021. vol. 9, no. 10, pp. 1122 DOI: 10.3390/math9101122.
18. Mandrikova O., Fetisova N. Modeling and analysis of ionospheric parameters based on multicomponent model, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2020. vol. 208, pp. 105399 DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105399.
19. Box G., Jenkins G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco: Holden Day, 1970. 537 pp.
20. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing: 3rd ed.*. London: Academic Press, 1999. 637 pp.
21. Левин В. П. *Теоретические основы статистической радиотехники*. Москва: Советское радио, 1969. 752 с.
22. Mandrikova O., Fetisova N. Analysis of ionospheric parameters during solar events and magnetic storms, *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. STRPEP 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Science*, 2023, pp. 3–13 DOI: 10.1007/978-3-031-50248-4_1.

Информация об авторах



Фетисова Надежда Владимировна ✉ – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории системного анализа Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Россия,  ORCID 0000-0001-5769-4726.



Мандрикова Оксана Викторовна ✉ – доктор технических наук, профессор, заведующая лабораторией системного анализа Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Россия,  ORCID 0000-0002-6172-1827.

References

- [1] Afraymovich E., Perevalova N. GPS-monitoring Verhnej Atmosfery Zemli [GPS Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere]. Irkutsk, GU NU RVKh VSNTs SO RAMN, 2006, 480 pp. (In Russian).
- [2] Nakamura M., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan, *J. Natl. Inst. Inf. Commun. Technol.*, 2009, vol. 56, pp. 391–406.
- [3] Tsagouri I. Space weather effects on the Earth's Upper Atmosphere: short report on ionospheric storm effects at middle latitudes, *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 346. DOI: 10.3390/atmos13020346.
- [4] Danilov A. D. Detailed analysis of the behavior of the F2-layer critical frequency prior to geomagnetic storms, *Adv. Space Res.*, 2022, vol. 70, no. 4, pp. 1078–1088. DOI: 10.1016/j.asr.2022.05.025.
- [5] Danilov A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances, *Adv. Space Res.*, 2013, vol. 52, no. 3, pp. 343–366.
- [6] Pulinets S. A., Legen'ka A. D., Hegai V. V., Kim V. P., Korsunova L. P. Ionosphere disturbances preceding earthquakes according to the data of ground based station of vertical ionospheric sounding Wakkanai, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 686–692.
- [7] Rodkin M. V., Liperovskaya E. V. On the difference in physical mechanisms of earthquakes at different depths and their ionospheric response, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2023, vol. 59, pp. 377–390. DOI: 10.1134/s1069351323030114.
- [8] Priyadarshi S. A review of ionospheric scintillation models, *Surveys in Geophysics*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 295–324. DOI: 10.1007/s10712-015-9319-1
- [9] Joshua B. W., Adeniyi J. O., Amory-Mazaudier C., Adebisi S. J. On the Pre-Magnetic Storm Signatures in NmF2 in Some Equatorial, Low and Mid-Latitude Stations, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2021, vol. 126, pp. e2021JA029459. DOI: 10.1029/2021JA029459
- [10] Kumar V. V., Parkinson M. L. A global scale picture of ionospheric peak electron density changes during geomagnetic storms, *Space Weather*, 2017, vol. 15, pp. 637–652. DOI: 10.1002/2016SW001573.
- [11] Mansilla G. A., Zossi M. M. Longitudinal variation of the ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm at equatorial/low latitudes, *Pure Appl. Geophys.*, 2020, vol. 177, pp. 5833–5844. DOI: 10.1007/s00024-020-02601-1.
- [12] Fetisova N. V., An algorithm for detecting intense anomalous changes in the time dependence of ionospheric parameters, *Computer Optics*, 2019, vol. 43, no. 6, pp. 1064–1071. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1064-1071. (In Russian).
- [13] Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Yu. Method of ionospheric parameter analysis in the problems of real-time data processing, *J. Phys. Conference Series by IOP Publishing*, 2018, vol. 1096, pp. 012091. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012091.
- [14] Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., Altadill D., Reinisch B. W., Pignalberi A., The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark, *Reviews of Geophysics*, 2022, vol. 60, no. 4, pp. e2022RG000792. DOI: 10.1029/2022RG000792.
- [15] Solomentsev D. V., Titov A. A., Khattatov B. V. Three-dimensional assimilation model of the ionosphere for the European region, *Geomagn. Aeron.*, 2013, vol. 53, no. 1, pp. 73–84. DOI: 10.1134/S0016793212060114.

- [16] Huba J. D., Liu H. L. Global modeling of equatorial spread F with SAMI3/WACCM-X, *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47, no. 14, pp.e2020GL088258. DOI: 10.1029/2020GL088258.
- [17] Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Y. Hybrid Model for Time Series of Complex Structure with ARIMA Components, *Mathematics*, 2021, vol. 9, no. 10, pp. 1122. DOI: 10.3390/math9101122.
- [18] Mandrikova O., Fetisova N., Modeling and analysis of ionospheric parameters based on multicomponent model, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2020, vol. 208, pp. 105399. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105399.
- [19] Box G., Jenkins G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco, Holden Day, 1970, 537 p.
- [20] Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing: 3rd ed.* London, Academic Press, 1999, 637 p.
- [21] Levin B. R. *Teoreticheskiye osnovy statisticheskoy radiotekhniki [Theoretical basis of statistical radio techniques]*. Moscow, Sovetskoye radio, 1969, 752 p. (In Russian).
- [22] Mandrikova O., Fetisova N. Analysis of ionospheric parameters during solar events and magnetic storms, *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. STRPEP 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Science*, 2023, pp. 3–13. DOI: 10.1007/978-3-031-50248-4_1

Information about the authors



Fetisova Nadezhda Vladimirovna ✉ – Ph. D. (Tech.), Researcher of System Analysis Laboratory at the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Kamchatka region, Russia,  ORCID 0000-0001-5769-4726.



Mandrikova Oksana Viktorovna ✉ – D. Sci. (Tech.), Professor, Head of System Analysis Laboratory at the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Kamchatka region, Russia,  ORCID 0000-0002-6172-1827.

ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-108-121>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 004.942, 51-73:550.3, 550.394



Моделирование направления осей главных напряжений горных пород при подготовке землетрясений

*М. И. Гапеев**, *А. А. Солодчук*

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7, Россия

Аннотация. Основная гипотеза возникновения предсейсмических аномалий направленности геоакустической эмиссии состоит в том, что на заключительной стадии подготовки землетрясения формируются постоянные направления осей главных напряжений пород в точке наблюдений. Направления этих осей в свою очередь определяют преимущественную ориентацию акустических источников. Для подтверждения этой гипотезы произведено моделирование ориентации осей главных напряжений, обусловленных процессом подготовки землетрясений. Расчеты основаны на модели, построенной в рамках линейной теории упругости: земная кора рассматривается в виде однородного изотропного упругого полупространства, силовое воздействие в очаге готовящегося землетрясения — в виде комбинации двойных пар сил. Учтена потенциальная энергия упругих деформаций, накопленная в процессе подготовки землетрясения. В работе использован каталог механики очагов землетрясений «The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog». Из него были выбраны параметры сейсмических событий, произошедших вблизи полуострова Камчатка с 1976 по 2020 годы. Так как ориентация акустического излучения зависит от азимутального направления на эпицентры землетрясений, то все рассматриваемые сейсмические события были разделены на три группы методом К-средних по пространственному расположению их эпицентров. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными оценками направления осей главных напряжений в пункте наблюдений «Микижа» (52,99° с. ш., 158,22° в. д.). Оценки были получены ранее по аномалиям направленности геоакустической эмиссии. Показано, что гистограммы распределения направлений осей главных напряжений согласуются с результатами экспериментальных оценок для двух групп землетрясений. Модальные интервалы и локальные максимумы гистограмм распределения попадают в диапазоны оценок ориентации осей главных напряжений от 290° до 320° и от 20° до 50° соответственно.

Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, предсейсмические аномалии, математическое моделирование, оси главных напряжений.

Получение: XX.11.2024; Исправление: XX.11.2024; Принятие: XX.11.2024; Публикация онлайн: XX.11.2024

Для цитирования. Гапеев М. И., Солодчук А. А. Моделирование направления осей главных напряжений горных пород при подготовке землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 108-121. EDN: RHEQMO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-108-121>.

Финансирование. Исследование выполнено за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2)

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

***Корреспонденция:**  E-mail: gapeev.sci@yandex.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Гапеев М. И., Солодчук А. А., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



PHYSICS

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-108-121>

Research Article

Full text in Russian

MSC 86-10



Modeling of the Directions of Rock Principle Stress Axes During Earthquake Preparation

*M. I. Gapeev**, *A. A. Solodchuk*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS,
684034, Paratunka, Mirnaya Str., 7, Russia

Abstract. The process of rock stress-strain state change causes acoustic radiation, which is called rock acoustic emission or geoacoustic emission. The relation between the earthquake preparation process and rock acoustic emission variations, which are called pre-seismic anomalies, has been stated in a number of investigations. The general mechanism of occurrences of these anomalies is associated with the fact that formation of a preparing earthquake source causes changes in the stress-strain state of rocks, surrounding it. One of the kinds of anomalies, occurring at the final stage of earthquake preparation, is the appearance of clearly expressed direction of acoustic activity. The main hypothesis of occurrence of this phenomenon is that a preparing earthquake source impact causes formation of constant direction of principle stress axes at an observation point. In their turn, the direction of these axes determines the primary orientation of acoustic radiation sources. To confirm this hypothesis, axis orientations of the main stresses, determined by the earthquake preparation process, were modeled. The estimates are based on the model constructed within the framework of elasticity linear theory where the Earth crust is considered in the form a homogeneous isotropic elastic half-space and the force impact at a preparing earthquake source is considered in the form of a combination of forces double pairs. Elastic deformation potential energy, accumulated during the earthquake preparation process, is taken into account. In the paper, we used the data from the catalog of earthquake source mechanics «The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog» on seismic events occurred near Kamchatka peninsula from 1976 until 2020. As long as the acoustic radiation direction depends on the azimuthal direction to earthquake epicenter, all the considered seismic events were divided into three groups by the method of K-averages according to spatial locations of their epicenters. The modeling results were compared with experimental estimates of the main stress axis directions at Mikizha observation site (52.99° N, 158.22° E). The estimates were earlier obtained based on the geoacoustic emission directivity anomalies. It was shown that histograms of main stress axis direction distributions agree with the results of estimates for two groups of earthquakes. Modal intervals of distribution histograms fall within the range of experimental estimates from 290° to 320° and from 20° to 50° accordingly.

Key words: geoacoustic emission, pre-seismic anomalies, mathematical modeling, main stress axes.

Received: XX.11.2024; Revised: XX.11.2024; Accepted: XX.11.2024; First online: XX.11.2024

For citation. Gapeev M. I., Solodchuk A. A. Modeling of the directions of rock principle stress axes during earthquake preparation. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 108-121. EDN: RHEQMO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-108-121>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (subject registration No. 124012300245-2)

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: gapeev.sci@yandex.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Gapeev M. I., Solodchuk A. A., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Процесс изменения напряженно-деформированного состояния горных пород приводит к возникновению акустического излучения, которое называется акустической эмиссией горных пород или геоакустической эмиссией. Источники этого излучения имеют дислокационную природу и могут быть обусловлены упругими [1], пластическими [2] или гранулированными свойствами среды [3].

В ряде исследований [4–6] установлена связь между процессом подготовки землетрясений и вариациями акустической эмиссии горных пород, которые в этом случае называют предсейсмическими аномалиями геоакустической эмиссии. Общий механизм возникновения этих аномалий связан с тем, что формирование очага готовящегося землетрясения вызывает изменение напряженно-деформированного состояния пород, окружающих его.

Одним из видов аномалий, проявляющихся на заключительной стадии подготовки землетрясений, является возникновение ярко выраженных направлений акустической активности [7]. Основная гипотеза возникновения этого явления заключается в том, что влияние очага готовящегося землетрясения приводит к формированию постоянного направления осей главных напряжений в точке наблюдений. Направления этих осей в свою очередь определяют преимущественную ориентацию источников акустического излучения.

В настоящей работе для подтверждения выдвинутой гипотезы произведено математическое моделирование направления осей главных напряжений, возникающих в горных породах при подготовке землетрясений вблизи полуострова Камчатка. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными оценками направления осей главных напряжений по данным аномалий направленности акустической эмиссии горных пород в пункте наблюдений «Микижа» (52,99° с. ш., 158,22° в. д.) [8].

Физическая постановка задачи

Направленность геоакустической эмиссии. В процессе генерации акустического излучения горными породами преобладают сдвиговые источники. Это связано с тем, что прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию. Преимущественная ориентация таких источников определяется направлением максимальных касательных напряжений, ориентированных в основном под углом 45° к оси наибольшего сжатия [9, 10]. При этом максимумы продольных акустических колебаний соответствуют направлениям, перпендикулярным этой оси для волны сжатия и совпадающим с ней для волны разряжения. Диаграммы направленности акустических колебаний сдвиговых источников схематично представлены на рис. 1.

Под влиянием очага готовящегося землетрясения будет возникать большое количество одинаково ориентированных источников акустического излучения. Это

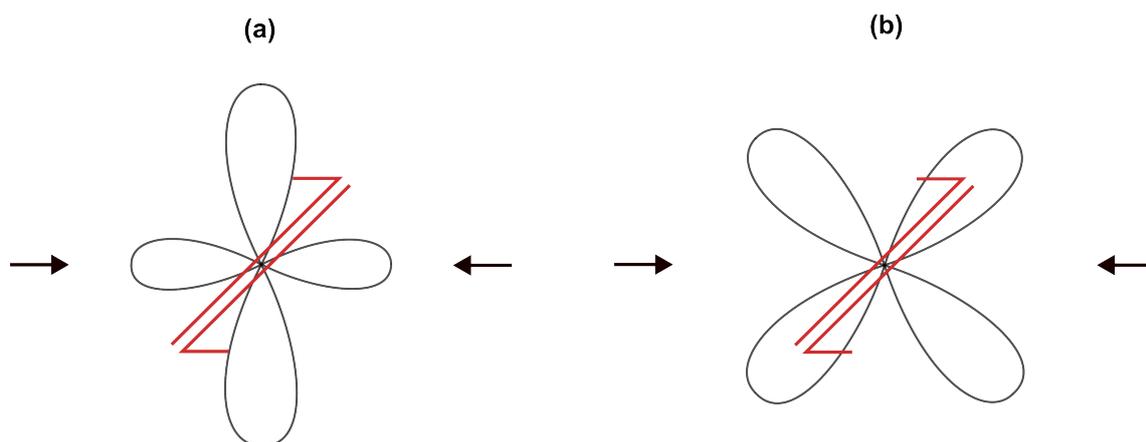


Рис. 1. Диаграммы направленности продольных (а) и поперечных (b) акустических колебаний сдвиговых источников. Стрелками показана ось наибольшего сжатия.

[Figure 1. Directivity diagrams of longitudinal (a) and transverse (b) acoustic oscillations of shear sources. Arrows indicate the strongest compression axis.]

обусловлено возникновением постоянного направления осей главных напряжений в точке наблюдений.

Так, например, проведенный анализ аномалий направленности геоакустической эмиссии, зарегистрированной в пункте наблюдения «Микижа» ($52,99^\circ$ с. ш., $158,22^\circ$ в. д.) на полуострове Камчатка в 2008 – 2012 гг., показал следующие результаты [8].

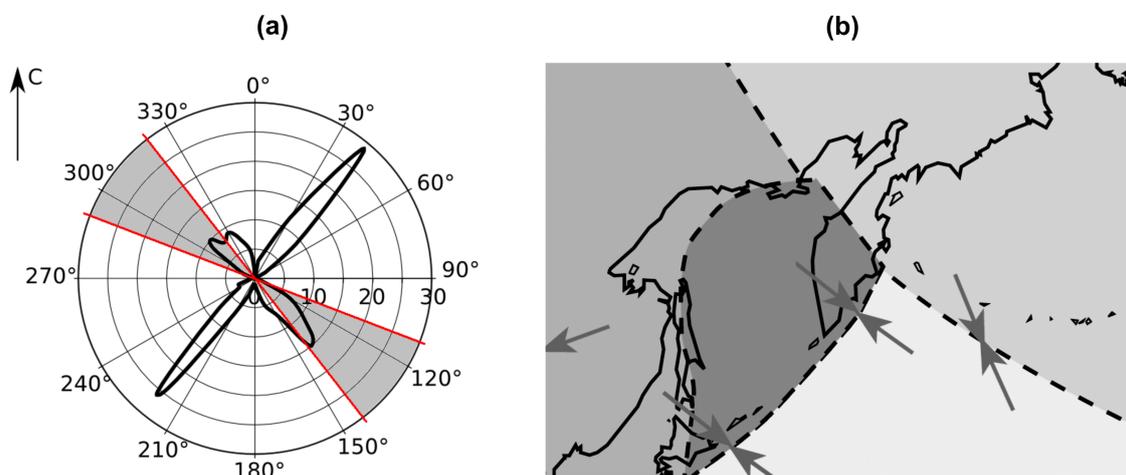


Рис. 2. Оценка ориентации оси максимального сжатия перед 74 землетрясениями в период 2008 – 2012 гг., — область ориентации оси сжатия (а). Ориентация тектонических напряжений у побережья Камчатки, $\longrightarrow \longleftarrow$ — направление осей горизонтального сжатия (b) [8].

[Figure 2. Estimate of the compression axis orientation before 74 earthquakes within the period 2008–2012 (a), — the compression axis orientation region. Orientation of tectonic stresses near the Kamchatka peninsula, $\longrightarrow \longleftarrow$ — direction of horizontal compression axes (b) [8].]

Максимумы акустической активности регистрировались с направлений близких к 40° и 220° , несколько реже – с направлений 140° и более широкого диапазона $300^\circ - 340^\circ$. На основании этих данных были получены оценки направления осей главных напряжений. Диапазон направления осей главных напряжений изменялся в интервале углов $110^\circ - 140^\circ$ со средним значением в 125° (рис. 2а). Полученный усредненный результат оценки ориентации оси совпал с генеральным направлением действия тектонических напряжений у побережья Южной Камчатки (рис. 2б).

Модель очага землетрясения. Очаг тектонического землетрясения представляет собой разрыв сплошности материала Земли, который возникает под действием упругих сдвиговых напряжений, накопленных в процессе тектонической деформации. В момент землетрясения происходит полное или частичное снятие накопленных напряжений в его очаге. Соответствующий очагу тектонического землетрясения разрыв является разрывом скольжения, то есть взаимное перемещение его берегов по нормали к поверхности разрыва равно нулю. Данное определение тектонического землетрясения было сформулировано Б. В. Костровым и основано на теории упругой отдачи Г. Ф. Рейда, которая гласит, что тектоническое землетрясение состоит в превращении части высвободившейся упругой потенциальной энергии в кинетическую энергию сейсмических волн.

Таким образом, деформации, возникающие при подготовке землетрясения, обусловлены приращением потенциальной энергией упругих деформаций ΔW , вызванным процессом подготовки землетрясения. Эта энергия больше, чем высвободившаяся сейсмическая энергия E . Величина η , равная отношению этих энергий, определяет эффективность снятия потенциальной энергии упругих деформаций и называется КПД землетрясения

$$\eta = \frac{E}{\Delta W}. \quad (1)$$

В механике сплошных сред процесс потери устойчивости среды изучается при неизменных свойствах материала среды и без нарушения его сплошности. В рамках этих ограничений описать очаг землетрясения можно через некоторую систему сил, распределенную по поверхности разрыва. Для описания произвольно ориентированного разрыва смещений в изотропной среде используют систему, состоящую из девяти пар двойных сил [11]. Такая система, схематически изображенная на рис. 3, соответствует модели очага землетрясения в виде двойного диполя. Пара двойных сил с моментами является минимально-необходимой системой сил для построения эквивалентного источника.

Принято считать, что фоновый деформационный процесс, протекающий в земной коре, ограничен сверху относительными деформациями порядка 10^{-8} . Такой порядок соответствует приливным деформациям, вызванным в первую очередь влиянием Луны и Солнца. Поэтому в дальнейшем будем считать деформации повышенными, если они превышают этот порог. Так как регистрация

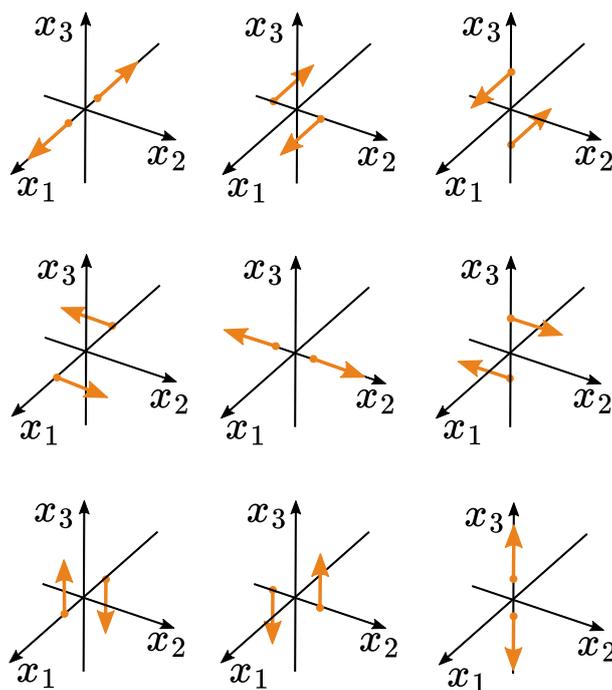


Рис. 3. Девять пар сил, необходимых для получения силового эквивалента при произвольно ориентированном разрыве смещений в среде.

[Figure 3. Nine pairs of forces required to obtain a force equivalent for an arbitrarily oriented displacement gap in the medium.]

геоакустического излучения производится у поверхности земной коры, то ограничимся рассмотрением напряжений и деформаций дневной поверхности.

Математическая постановка задачи

Уравнения и граничные условия. Рассмотрим земную кору в виде упругого однородного изотропного полупространства. Поведение такой среды можно описать при помощи системы дифференциальных уравнений Ламе:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} + X_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \tag{2}$$

где u_i — компоненты вектора перемещения, λ, μ — коэффициенты Ламе, X_i — компоненты вектора массовых сил; индексами после запятой обозначено дифференцирование по соответствующим пространственным координатам.

Пусть полупространство занимает область $x_3 \leq 0$. Тогда поверхность Земли задается уравнением $x_3 = 0$. Эта поверхность свободна от напряжений в направлении оси x_3 , следовательно на $x_3 = 0$ заданы граничные условия вида:

$$\sigma_{31}|_{x_3=0} = \sigma_{32}|_{x_3=0} = \sigma_{33}|_{x_3=0} = 0. \tag{3}$$

Напряжения, создаваемые очагом готовящегося землетрясения, стремятся к нулю на бесконечности:

$$\lim_{x_1 \rightarrow \pm\infty} \sigma_{ij} = \lim_{x_2 \rightarrow \pm\infty} \sigma_{ij} = \lim_{x_3 \rightarrow -\infty} \sigma_{ij} = 0. \tag{4}$$

Компоненты вектора массовых сил X , соответствующие системе, изображенной на рис. 3, выражаются следующим образом:

$$X_i = p_{ij} \frac{\partial \delta(x - \xi)}{\partial \xi_j}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где p_{ij} — интенсивность соответствующей пары сил; $\delta(x - \xi)$ — дельта-функция; (ξ_1, ξ_2, ξ_3) — точка приложения системы сил.

Аналитическое решение. Для задачи (2) с граничными условиями (3) и (4) известны функции Грина, полученные Р. Миндлиным. Для единичной силы, приложенной к точке (ξ_1, ξ_2, ξ_3) упругого полупространства и направленной вдоль оси x_3 , функция Грина $g^3(x)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} g_1^3 &= \frac{(x_1 - \xi_1)}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{(x_3 - \xi_3)}{r_1^3} + \frac{(3-4\nu)(x_3 - \xi_3)}{r_2^3} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)} + \frac{6x_3\xi_3}{r_2^5} \right], \\ g_2^3 &= \frac{(x_2 - \xi_2)}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{(x_3 - \xi_3)}{r_1^3} + \frac{(3-4\nu)(x_3 - \xi_3)}{r_2^3} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)} + \frac{6x_3\xi_3(x_3 + \xi_3)}{r_2^5} \right], \\ g_3^3 &= \frac{1}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{(3-4\nu)}{r_1} + \frac{5-12\nu+8\nu^2}{r_2} + \frac{(x_3 - \xi_3)^2}{r_1^3} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(3-4\nu)(x_3 + \xi_3)^2 - 2x_3\xi_3}{r_2^3} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где ν — коэффициент Пуассона, а r_1 и r_2 :

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2}, \\ r_2 &= \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Функция Грина $g^1(x)$ для единичной силы, направленной вдоль оси x_1 , выражается в виде:

$$\begin{aligned} g_1^1 &= \frac{1}{16\pi\mu(1-\nu)} \left\{ \frac{3-4\nu}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{(x_1 - \xi_1)^2}{r_2^3} + \frac{(3-4\nu)(x_1 - \xi_1)}{r_2^3} + \right. \\ &\quad \left. \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)[r_2^2 - (x_1 - \xi_1)^2 - r_2(x_3 + \xi_3)]}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)^2} \right\}, \\ g_2^1 &= \frac{(x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2)}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{1}{r_1^3} + \frac{(3-4\nu)}{r_2^3} - \frac{6x_3\xi_3}{r_2^5} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)^2} \right], \\ g_3^1 &= \frac{(x_1 - \xi_1)}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{(x_3 - \xi_3)}{r_1^3} + \frac{(3-4\nu)(x_3 - \xi_3)}{r_2^3} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)} - \right. \\ &\quad \left. \frac{6x_3\xi_3(x_3 + \xi_3)}{r_2^5} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

Ввиду симметричности задачи, функция Грина $g^2(x)$, соответствующая действию единичной силы вдоль оси x_2 , может быть получена из функции

$g^1(x)$ заменой осей x_1 и x_2 . Функции Грина, отвечающие действию двойных сил, могут быть получены дифференцированием функций $g^i(x)$ по пространственным координатам, то есть в виде $\partial g^i(x)/\partial x_j$ [12]. При $i = j$ получим решение для пары двойных сил, направленных вдоль соответствующей оси, при $i \neq j$ — для пары двойных сил, направленных вдоль оси i с моментом относительно оси с номером, отличным от i, j .

В общем случае, решения для смещений в упругом полупространстве можно получить при помощи формулы Вольтерра [13]:

$$u_k(x) = \int_{\Sigma} s_i(\xi) \sigma_{ij}^k(\xi, x) n_j d\Sigma, \quad (9)$$

где $s_i(\xi)$ — смещение на поверхности разрыва Σ , n_j — компоненты единичного вектора нормали к поверхности Σ .

Учитывая, что напряжения могут быть выражены через деформации в соответствии с законом Гука, формула Вольтерра для случая однородной и изотропной среды может быть записана в виде:

$$u_k(x) = \int_{\Sigma} \left[\mu(s_p n_q + s_q n_p) + \lambda s_k n_k \delta_{pq} \right] \frac{\partial g_k^p(x, \xi)}{\partial \xi_q} d\Sigma = \int_{\Sigma} m_{pq} \frac{\partial g_k^p(x, \xi)}{\partial \xi_q} d\Sigma, \quad (10)$$

где $m_{pq} = \mu(s_p n_q + s_q n_p) + \lambda s_k n_k \delta_{pq}$ — тензор плотности сейсмического момента [11], который отражает механику очага землетрясения.

Таким образом, в случае точечного источника, решение поставленной задачи может быть найдено в следующем виде:

$$u_k(x) = m_{pq} \frac{\partial g_k^p(x, \xi)}{\partial \xi_q}. \quad (11)$$

Формула (11) будет использована в дальнейшем как основная при моделировании.

Поскольку связь между компонентами тензора деформации ε_{ij} и потенциальной энергией упругих деформаций E квадратична, то повышающий коэффициент, позволяющий рассчитать напряженно-деформированное состояние земной коры при подготовке землетрясения, будем полагать равным $\eta^{-0,5}$. Удобный, с точки зрения вычислений, вариант оценки этого коэффициента был дан И. П. Добровольским [15]:

$$\eta = 10^{0,26M_w - 3,93}, \quad (12)$$

где M_w — моментная магнитуда землетрясения.

Результаты моделирования

Исходные данные. Для моделирования из каталога механики очагов землетрясений «The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog» [14] была отобрана информация обо всех землетрясениях, произошедших вблизи полуострова Камчатка с 1976 г. по 2020 г. В частности использовались данные о дате и времени землетрясения, координатах эпицентра, глубине гипоцентра,

магнитуде землетрясения, тензоре плотности сейсмического момента, скалярном сейсмическом моменте. Координаты эпицентров землетрясений находились в диапазоне широт от 49° с. ш. до 60° с. ш. и диапазоне долгот от 149° в. д. до 170° в. д. Всего выборка содержала $N = 877$ землетрясений.

Результаты наблюдений показывают, что ориентация акустического излучения зависит от азимутального направления на эпицентры землетрясений [7]. Поэтому все рассматриваемые землетрясения были разделены на три кластера методом К-средних по пространственному расположению их эпицентров (рис. 4а).

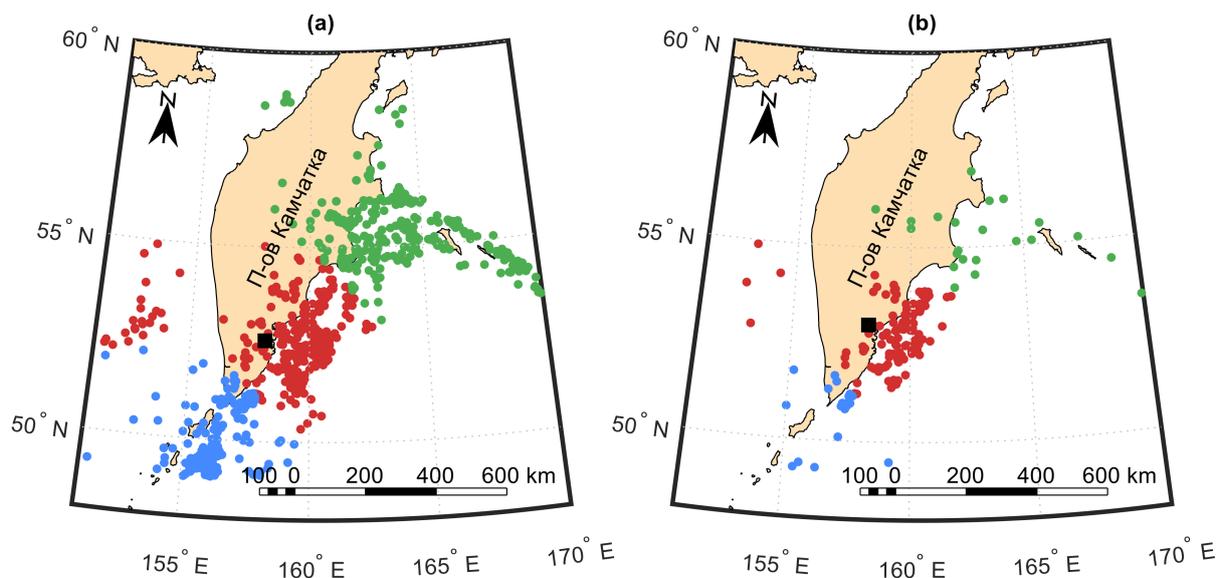


Рис. 4. Все $N = 877$ землетрясений, разделенные на кластеры по пространственному расположению их эпицентров: ● — кластер № 1, ● — кластер № 2, ● — кластер № 3 (а). Землетрясения, которые по результатам моделирования могли вызвать повышенные деформации в пункте наблюдения «Микижа» — ■ (б).

[Figure 4. All $N = 877$ earthquakes divided into clusters with respect to spatial locations of their epicenters: ● — cluster № 1, ● — cluster № 2, ● — cluster № 3.

Earthquakes which, according to modeling results, could cause deformation intensification at Mikizha observation site — ■ (b).]

Моделирования направления осей главных напряжений. Для каждого землетрясения из выборки было произведено моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры, возникающее при его подготовке. Рассчитаны деформации

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{\max}, \quad (13)$$

где $\sigma_{\max} = \max\{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_3|\}$ — максимальное касательное напряжение, а $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные значения тензора напряжений.

В результате были отобраны только те землетрясения, которые вызывают повышенные предсейсмические деформационные возмущения в пункте

наблюдений «Микижа» (рис. 4b). Всего таких землетрясений было 169, большая часть из них принадлежат кластеру № 2. Далее для каждого землетрясения в точке, соответствующей пункту наблюдений, вычислены собственные векторы тензора напряжений, определяющие направления главных осей. Ось максимального сжатия сонаправлена с главной осью тензора напряжений, соответствующей максимальному из значений $|\sigma_1|$, $|\sigma_2|$. Гистограммы распределения направления этой оси представлены на рис. 5. Цвет гистограммы соответствует кластеру землетрясений. Серым на гистограммах обозначена область ориентации оси максимального сжатия в пункте наблюдений «Микижа» по результатам анализа аномалий направленности геоакустической эмиссии.

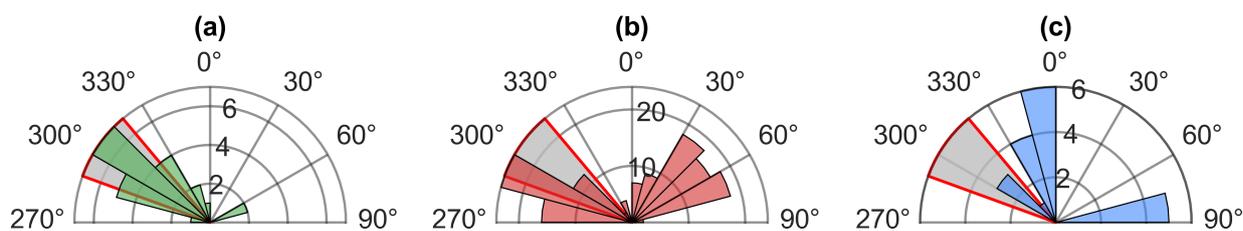


Рис. 5. Гистограммы распределения направлений оси максимального сжатия в пункте наблюдений «Микижа» при подготовке землетрясений из кластеров № 1 (а), № 2 (b), № 3 (с) по результатам моделирования,  — область ориентации оси максимального сжатия по результатам анализа аномалий направленности геоакустической эмиссии.

[Figure 5. Distribution histograms of main stress axis direction angles at Mikizha observation site during preparation of the earthquakes from the clusters № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c) according to the modeling results,

 — orientation region of the compression axis according to the analysis results of geoacoustic emission directivity anomalies.]

Как видно из рис. 5, результаты моделирования осей главных напряжений при подготовке землетрясений из кластеров № 1 и № 2 наиболее согласуются с экспериментальными оценками. Модальный интервал гистограммы для землетрясений из кластера № 1 имеет границы от 300° до 315° и полностью покрывается интервалом экспериментальной оценки направления оси максимального сжатия (рис. 5а). Границы модального интервала для землетрясений из кластера № 2 лишь частично покрываются этим интервалом. Кроме этого присутствуют локальные максимумы значений гистограммы распределения в области от 30° до 75°, которые перпендикулярны направлению оси максимального сжатия, полученному в результате экспериментальной оценки (рис. 5b). Направления оси, полученные в результате моделирования напряженно-деформированного состояния земной коры при подготовке землетрясений из кластера № 3, плохо согласуются с экспериментальными оценками (рис. 5с). Это может быть связано с тем, что при оценке оси максимального сжатия по аномалиям направленности геоакустической эмиссии, землетрясения из этого региона не рассматривались [8].

Заключение

Произведено моделирование направления осей главных напряжений горных пород при подготовке землетрясений для подтверждения гипотезы возникновения аномалий направленности геоакустической эмиссии. Эта гипотеза заключается в том, что влияние очага готовящегося землетрясения приводит к образованию постоянного направления осей главных напряжений в точке наблюдений.

В работе использована модель, разработанная ранее в рамках линейной теории упругости [16]. Земля рассмотрена в виде однородного изотропного упругого полупространства, очаг готовящегося землетрясения — в виде комбинации двойных пар сил. В модели также учтена потенциальная энергия упругих деформаций, накопленная в процессе подготовки землетрясения.

В рамках этой модели рассчитаны ориентации осей главных напряжений в пункте наблюдений «Микижа». Используются данные из каталога механики очагов землетрясений «The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog» о сейсмических событиях, произошедших вблизи полуострова Камчатка с 1976 по 2020 годы. Все рассматриваемые землетрясения были разделены на три группы по пространственному расположению их эпицентров.

Показано, что гистограммы распределения направлений осей главных напряжений согласуются с результатами экспериментальных оценок для двух групп землетрясений. Модальные интервалы и локальные максимумы гистограмм распределения попадают в диапазоны оценок ориентации осей максимального сжатия от 290° до 320° и от 20° до 50° соответственно.

Дальнейшее направление работы связано с более детальным анализом результатов моделирования и сопоставлении их с данными наблюдений. Необходимо применение статистических критериев для сравнения распределений угловых наблюдений, а также использование точечных и интервальных оценок их параметров.

Список литературы

1. Marapulets Y., Solodchuk A., Lukovenkova O., Mishchenko M., Shcherbina A. Sound Range AE as a Tool for Diagnostics of Large Technical and Natural Objects, *Sensors*, 2023. vol. 23, no. 3:1269, pp. 1–14.
2. Лавров А. В., Шкуратник В. Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор), *Акустический журнал*, 2005. Т. 51, С. 6–18.
3. Гик Л. Д. Нелинейность гранулированных и трещиноватых горных пород в условиях малых деформаций, *Физическая мезомеханика*, 2005. Т. 8, № 1, С. 81–89.
4. Моргунов В. А., Любошевский М. Н., Фабрициус В. З., Фабрициус З. Э. Геоакустический предвестник Спитакского землетрясения, *Вулканология и сейсмология*, 1991. № 4, С. 104–106.
5. Gregori G. P., Poscolieri, M., Paparo G., De Simone S., Rafanelli C., Ventrice G. “Storms of crustal stress” and AE earthquake precursors, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010. vol. 10, no. 2, pp. 319–337.
6. Марापудец Ю. В., Шевцов В. М., Ларионов И. А., Мищенко М. А., Щербина А. О., Солодчук А. А. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений, *Тихоокеанская геология*, 2012. Т. 31, № 6, С. 59–67.
7. Марапудец Ю. В., Щербина А. О. Оценка ориентации оси наибольшего сжатия пород с использованием точечной приемной системы на основе комбинированного приемника, *Акустический журнал*, 2018. Т. 64, № 6, С. 718–726.

8. Марапулец Ю.В. *Высокочастотный акустозмиссионный эффект при деформировании приповерхностных осадочных пород в сейсмоактивном регионе*, дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Институт космофизических исследований ДВО РАН, 2015. 210 с.
9. Виноградов С.Д. Условия на разрыве и спектры излучаемых им волн, *Известия АН СССР. Физика Земли*, 1976. Т. 7, С. 20–26.
10. Шамина О.Г. Понятовская В.И. *Модельные исследования неоднородных и трещиноватых сред*. М.: ИФЗ РАН, 1993. 179 с.
11. Аки К., Ричардс П. *Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1*. М.: Мир, 1983. 519 с.
12. Лурье А.И. *Теория упругости*. М.: Наука, 1970. 940 с.
13. Segall P. *Earthquake and volcano deformation*. Princeton: Princeton University Press, 2010. 456 pp.
14. *The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog* <https://www.globalcmt.org/>.
15. Добровольский И.П. *Математическая теория прогноза и подготовки тектонического землетрясения*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
16. Gapeev M., Marapulets Y. Modeling Locations with Enhanced Earth's Crust Deformation during Earthquake Preparation near the Kamchatka Peninsula, *Applied Sciences*, 2022. vol. 13, no. 1:290, pp. 1–14.

Информация об авторах



Гапеев Максим Игоревич ✉ – младший научный сотрудник лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, Паратунка, Россия,
 ORCID 0000-0001-5798-7166.



Солодчук Александра Андреевна ✉ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории акустических исследований, ученый секретарь, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, Паратунка, Россия,
 ORCID 0000-0002-6761-8978.

References

- [1] Marapulets Y., Solodchuk A., Lukovenkova O., Mishchenko M., Shcherbina A. Sound Range AE as a Tool for Diagnostics of Large Technical and Natural Objects, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 3:1269, pp. 1–14. DOI: 10.3390/s23031269.
- [2] Lavrov A. V., Shkuratnik V. L. Deformation- and fracture-induced acoustic emission in rocks (review), *Acoustical Physics*, 2005, vol. 51, pp. 6-18 (In Russian).
- [3] Gik L. D. Nonlinearity of granular and cracked rocks in the conditions of small strains, *Physical Mesomechanics*, vol. 8, no. 1, pp. 81–89 (In Russian).
- [4] Morgunov V. A., Lyubashevsky M. N., Fabricius V. Z., Fabricius Z. E. Geoacoustic harbinger of the Spitak earthquake [Geoakusticheskiy predvestnik Spitakskogo zemletryaseniya], *Journal of Volcanology and Seismology*, 1991. No. 4, pp. 104-106 (In Russian).
- [5] Gregori G. P., Poscolieri M., Paparo G., De Simone S., Rafanelli C., Ventrice G. “Storms of crustal stress” and AE earthquake precursors, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010. vol. 10, no. 2, pp. 319–337. DOI: 10.5194/nhess-10-319-2010.
- [6] Marapulets Y. V., Shevtsovs B. M., Larionov I. A., Mishchenko M. A., Shcherbina A. O, Solodchuk A. A. Geoacoustic emission response to deformation processes activation during earthquake preparation, *Russ. J. of Pac. Geol*, 2012, no. 6, 457–464. DOI: 10.1134/S1819714012060048.
- [7] Marapulets Y. V., Shcherbina A. O. Assessing the orientation of the axis of maximum compression of rocks with a combined point receiver system, *Acoustical Physics*, vol. 64, no. 6, pp. 742–749.
- [8] Vinogradov S. D. Conditions at the rupture and spectra of the waves emitted by it, *Izvestiya [Usloviya na razryve i spektry izluchaemykh im voln]*, *Physics of the Solid Earth*, 1976, vol. 7, pp. 20–26.
- [9] Shamina O. G. Poniatovskaya V. I. Model studies of inhomogeneous and fractured media [Model'nye issledovaniya neodnorodnykh i treshchinovatykh sred], Moscow, IFZ RAS, 1993, 179 p. (In Russian).
- [10] Marapulets Yu. V. High-frequency acousto-emission effect during deformation of near-surface sedimentary rocks in a seismically active region [Vysokochastotnyy akustoemissionnyy effekt pri deformirovani pri poverkhnostnykh osadochnykh porod v seysmoaktivnom regione], Diss. ... Doc. Sci. (Phys.-Math.). Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 2015, 210 p. (In Russian).
- [11] Aki K., Richards P. *Quantitative Seismology*, 2nd ed., Cambridge, University Science Books, 2002, 704 p.
- [12] Lurie A. I. *Theory of elasticity [Teoriya uprugosti]*, Moscow, Nauka, 1970, 940 p. (In Russian).
- [13] Segall P. *Earthquake and volcano deformation*, Princeton, Princeton University Press, 2010, 456 p.
- [14] The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog <https://www.globalcmt.org/>.
- [15] Dobrovolskiy I. P. Mathematical theory of prediction and preparation of a tectonic earthquake [Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya], Moscow, FIZMATLIT, 2009, 240 p. (In Russian).
- [16] Gapeev M., Marapulets Y. Modeling Locations with Enhanced Earth's Crust Deformation during Earthquake Preparation near the Kamchatka Peninsula, *Applied Sciences*, 2022, vol. 13, no. 1:290, pp. 1–14. DOI: 10.3390/app13010290.

Information about the authors



Gapeev Maksim Igorevich ✉ – Junior Researcher, Lab. of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0001-5798-7166.



Solodchuk Aleksandra Andreevna ✉ – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Senior Researcher, Lab. of Acoustic Research, Scientific Secretary, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-6761-8978.

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-122-140>



Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 550.375

Оценка величины геомагнитно-индуцированных токов в Центральном энергорайоне энергосистемы Камчатского края

А. Ю. Гвоздарев, В. П., Сивоконь, С. Ю. Хомутов*

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7, Россия

Аннотация. Выполнено моделирование геоэлектрического поля, напряжений на линиях электропередачи (ЛЭП) и геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в ЛЭП Центрального энергорайона энергосистемы Камчатского края во время экстремальной магнитной бури 10-11 мая 2024 г. При расчёте использована одномерная модель распределения удельного электрического сопротивления литосферы на территории Камчатки со средним удельным электрическим сопротивлением около 100 Ом·м. Учтена длина и ориентация ЛЭП, погонное сопротивление их проводов, сопротивление и количество трансформаторов на концевых подстанциях, а также эффект распределения ГИТ между соседними близко расположенными подстанциями в агломерации «Петропавловск-Камчатский — Елизово». Показано, что амплитуда ГИТ во время бури могла достигать 1 А в ЛЭП 220 кВ «Мутновская ГеоЭС — подстанция (ПС) Авача» и ЛЭП 110 кВ «Елизово — Мильково», ориентированных вдоль меридиана, и 1.5 А в ЛЭП 110 кВ «Апача — Елизово». Оценка воздействия ГИТ на силовые трансформаторы показала, что наибольший эффект ожидается на ПС «Апача»: напряжённость генерируемого ГИТ в магнитопроводе магнитного поля составила 24 % от напряжённости рабочего магнитного поля. Такое воздействие опасно для трансформатора, но может вызывать генерацию чётных гармоник.

Ключевые слова: геомагнитно-индуцированные токи, Камчатка, магнитные бури, моделирование, одномерная модель проводимости, коэффициент намагничивания сердечника

Получение: XX.11.2024; Исправление: XX.11.2024; Принятие: XX.11.2024; Публикация онлайн: XX.11.2024

Для цитирования. Гвоздарев А.Ю., Сивоконь В.П., Хомутов С.Ю. Оценка величины геомагнитно-индуцированных токов в Центральном энергорайоне энергосистемы Камчатского края // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2024. Т. 49. № 4. С. 122-140. EDN: QNQZMC . <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-122-140>.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Госзадания ИКИР ДВО РАН №124012300245-2

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

***Корреспонденция:** ✉ E-mail: gvozdarev@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License



© Гвоздарев А. Ю., Сивоконь В. П., Хомутов С. Ю., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-122-140>

Research Article

Full text in Russian

MSC 86-10, 86A25



Estimation of the Geomagnetically-Induced Current Magnitude in the Central Power District of the Kamchatka Power System

*A. Y. Gvozdarev**, *V. P., Sivokon*, *S. Y. Khomutov*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS
684034 Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

Abstract. A simulation of the geoelectric field, voltages on power transmission lines and geomagnetically-induced currents (GIC) in the power lines of the Central Power District of the Kamchatka Region power system during an extreme magnetic storm was performed. The calculation uses a one-dimensional model of the lithosphere electrical conductivity distribution at Kamchatka with an average electrical resistivity of about 100 Ohms·m. The length and orientation of power lines, the linear resistance of their wires, the resistance and number of transformers at terminal substations, as well as the GIC distribution effect between neighboring closely located substations in the agglomeration «Petropavlovsk-Kamachsky — Elizovo» are taken into account. It is shown that the GIC amplitude can reach 1 A at the power lines «Mutnovskaya geothermal power plant — electrical substation Avacha» and «Elizovo — Milkovo» which are oriented along the meridian. On a 110 kV power line «Apacha — Yelizovo», which is oriented in the latitudinal direction, a GIC value of about 1.5 A can be observed. An assessment of the GIC effect on power transformers at the Apacha electrical substation showed that the intensity of the magnetic field generated by GIC in the transformer core does not exceed 24 % of the intensity of the working magnetic field. Such an effect is not dangerous for the transformer, but it can cause the generation of even harmonics.

Key words: geomagnetically induced current, Kamchatka, geomagnetical storm, simulation, 1D resistivity model, core magnetization coefficient

Received: XX.11.2024; Revised: XX.11.2024; Accepted: XX.11.2024; First online: XX.11.2024

For citation. Gvozdarev A. Y., Sivokon V. P., Khomutov S. Y. Estimation of the geomagnetically-induced current magnitude in the Central Power District of the Kamchatka power system. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 122-140. EDN: QNQZMC . <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-122-140>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (subject registration No. 124012300245-2: Russian Federation).

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: gvozdarev@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Gvozdarev A. Y., Sivokon V. P., Khomutov S. Y., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) — это потенциально опасное явление космической погоды, действующее на электрические сети во время сильных магнитных бурь. В результате быстрых вариаций геомагнитного поля (например, во время внезапных начал магнитных бурь, SSC) в земной коре генерируется геоэлектрическое поле, которое создает напряжение между точками заземления линий электропередач (ЛЭП). Величина этого поля зависит от скорости изменения геомагнитного поля и удельного сопротивления подстилающих пород. Протекая по первичным обмоткам силовых трансформаторов, ГИТ вызывают размагничивание их сердечников, увеличение реактивной мощности и потерь холостого хода, перегрев трансформаторов, повышение уровня чётных гармоник в сети, зачастую провоцируя ложное срабатывание автоматики [1]. Описаны случаи выхода из строя силовых трансформаторов и развития сетевых аварий вследствие действия ГИТ [2].

В последние годы большое количество работ посвящено исследованию ГИТ в средних и низких широтах [3]. Системы регистрации ГИТ созданы в США, Новой Зеландии [4], ЮАР [2], Бразилии [5], Великобритании [6], Австрии [7], Китае [8], Японии [9], Испании [10] и Мексике [11]. Разработаны системы моделирования ГИТ в энергосетях многих государств, находящихся в средних и низких широтах [5], [12], [6], [10], [11], [13], [14]. При этом отмечается, что SSC способны создавать потенциально опасные ГИТ на любых широтах, эффект от которых на компоненты электрической сети может накапливаться. Например, описаны случаи выхода из строя силовых трансформаторов в ЮАР в результате серии магнитных бурь в 2003 г. [2].

В России регистрация ГИТ ведётся лишь на Кольском полуострове [15]. Единственная система измерения ГИТ в России принадлежит Полярному геофизическому институту и Центру энергетики Севера, которые с 2010 г. осуществляют мониторинг ГИТ в сетях «Колэнерго» в условиях высоких геомагнитных широт. За это время накоплен значительный материал, описаны статистические свойства распределений ГИТ, построены регрессионные модели связи ГИТ с АЕ-индексом и скоростью изменения магнитной индукции, оценены экстремальные значения ГИТ и описаны условия их формирования. Согласно результатам этих работ, кроме высоких значений тока аврорального электроджета, важное значение для генерации ГИТ играют также микропульсации классов P_{с5}/P_{і3}, в том числе и в невозмущенной обстановке [16].

В среднеширотных регионах России подобные исследования находятся на начальной стадии. В частности, было показано, что существуют признаки наводки ГИТ в энергосистемах Камчатки [17] и Алтая [18]. В этой ситуации особую актуальность приобретают работы по моделированию ГИТ, т. к. они могут помочь определить те элементы энергосистемы, которые наиболее подвержены воздействию ГИТ, теоретически. Показателен пример Мексики [11], где сначала было проведено моделирование ГИТ на территории всей страны, а затем на

четырёх наиболее подверженных ГИТ подстанциях были установлены системы их регистрации.

Данная работа посвящена оценке ГИТ в Центральном энергорайоне энергосистемы Камчатского края во время наиболее сильной магнитной бури за последние 20 лет 10-11 мая 2024 г. по данным Геофизической обсерватории «Паратунка» ИКИР ДВО РАН.

Методика расчётов

На основе [19] была развита модель для расчёта геомагнитно-индуцированных токов в энергосети Камчатского края (по аналогии с моделью для Алтая [20]). Входными данными для модели являются результаты измерений вариаций геомагнитного поля на Геофизической обсерватории «Паратунка». По ним рассчитывались фурье-спектры восточной $B_x(f)$ и северной составляющих $B_y(f)$ (здесь f – частота вариаций). Умножение этих спектров на передаточную функцию $K(f)$ позволяет определить спектры компонент геоэлектрического поля

$$E_x(f) = K(f)B_y(f), E_y(f) = -K(f)B_x(f), \quad (1)$$

где $E_x(f), E_y(f)$ – фурье-спектры восточной и северной компонент геоэлектрического поля, соответственно. В модели однородной проводимости

$$K = \sqrt{\frac{i2\pi f\rho}{\mu_0}}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление земной коры, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Обратное преобразование Фурье позволяет рассчитать ряды значений компонент геоэлектрического поля $E_x(t), E_y(t)$ в различные моменты времени t . По ним рассчитывается ряд значений разности потенциалов U_{ij} между точками заземления ЛЭП с координатами $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$

$$U_{ij}(t) = E_x(t)(x_j - x_i) + E_y(t)(y_j - y_i) \quad (3)$$

Геомагнитно-индуцированный ток в ЛЭП рассчитывается по закону Ома: $I_{ij} = U_{ij}/R_{ij}$. Сопротивление R_{ij} включает в себя сопротивление ЛЭП, первичных обмоток концевых трансформаторов и их заземлений. Ток в заземляющих нейтральных трансформаторах на подстанциях, к которым подходит более одной ЛЭП, определяется как сумма токов от каждой ЛЭП.

Центральный энергорайон энергосистемы Камчатского края

Центральный энергорайон энергосистемы Камчатского края объединяет в себе генерирующие мощности, ЛЭП, подстанции и сети низкого напряжения Петропавловска-Камчатского, Елизовского, Усть-Большерецкого и Мильковского районов. Генерация энергии осуществляется на ТЭЦ-1 (установленная мощность

204 МВт), ТЭЦ-2 (160 МВт), Мутновской (50 МВт) и Верхнемутновской (12 МВт) геотермальных электростанциях, каскаде Толмачёвских ГЭС (45.4 МВт). Систему высоковольтной электропередачи условно можно разделить на «длинные» ЛЭП, соединяющие подстанции «Елизово» и «Авача» с удалёнными частями энергорайона (они представлены ЛЭП 220 кВ либо выполнены в габаритах 220 кВ проводом АС-240/56 с погонным сопротивлением 0.12 Ом/км) и ЛЭП 110 кВ небольшой длины, соединяющие подстанции в Елизово, Петропавловске и Вилючтинске.

Характеристики ЛЭП согласно табл. 2.9.1 из [21] приведены в табл. 1. Также там представлены расчётные сопротивления для ЛЭП (три фазы, соединённых параллельно) согласно формуле $R = \rho_L L/3$, где ρ_L - погонное сопротивление проводов ЛЭП. Согласно данным с <https://powersystem.info> (для АС-150/24 $\rho_L = 0.198$ Ом/км, для АС-120/19 $\rho_L = 0.249$ Ом/км), для провода АААС Z177 принималось значение $\rho_L = 0.18$ Ом/км [22]. При расчётах сопротивления ЛЭП «Авача — Зеленовские озёрки» было учтено двухцепное построение линии. Так как на трассах «КСИ — Елизово», «Елизово — Авача», «Авача — Приморская», «Елизово — Чайка», «Приморская — Крашенинникова» проложено по две ЛЭП параллельно, то сопротивление на них получилось 0.79, 0.26, 0.75, 1.13, 0.53 Ом соответственно.

Информация о силовых трансформаторах 110 и 220 кВ на подстанциях Центрального энергорайона согласно табл. 2.9.2 и табл. 6.2.2 из [21] приведена в табл. 2. Также там показаны сопротивление трансформатора на фазу R_T согласно данным с <https://powersystem.info> и сопротивление подстанции протеканию ГИТ R_{ES} . При расчёте последнего сопротивление заземления принималось равным 2 Ом, считалось, что все трансформаторы заземлены, а внешние обмотки соединены «звездой», сопротивление внешней обмотки (на фазу) принималось равным $R_T/2$, а сопротивление трансформатора протеканию ГИТ $R_T/6$. Информация из табл. 6.2.2 из [21] использовалась для того, чтобы определить, какие трансформаторы отключены от сети. Для ТЭЦ-1 считалось, что к распределительному устройству подключены три блочных трансформатора номинальной мощностью 60, 80, 80 МВА, а для ТЭЦ-2 — два блочных трансформатора мощностью по 80 МВА и подбирались сопротивления R_T для их аналогов из <https://powersystem.info>. Заметим, что в сети 110 кВ обычно далеко не все силовые трансформаторы заземляются, однако в доступных нам источниках нет информации о том, какие из них заземлены, а какие — нет. Поэтому в выполненных далее расчётах сопротивление сети протеканию ГИТ занижено (за счёт включения дополнительных стоков в землю), следовательно расчётные значения ГИТ надо рассматривать как их верхнюю оценку.

С точки зрения генерации ГИТ «короткие» ЛЭП и подстанции, которые они соединяют, можно объединить в одну точку заземления, т. к. ток, генерирующийся на длинных радиальных ЛЭП, будет распределяться между ними, снижая эффект воздействия на элементы энергосистемы, а собственные ЭДС, генерируемые на относительно небольших расстояниях, будут невелики. Для оценки суммарного

Таблица 1

**Характеристики линий электропередачи 110 и 220 кВ [110 and 220 kV
power lines characteristics]**

ЛЭП	Длина L, км	Провод	R, Ом
Мутновская ГеоЭС — Авача	77.7	АС-240/56	3.10
Елизово – Развилка	94.2	АС-240/56	3.76
Развилка – Мильково	207.158	АС-240/56	8.27
Развилка – Апача	49.611	АС 240/56	1.98
Апача – Кавалерская	34.84	АС-240/56	1.39
Толмачевская ГЭС-2 — Апача	59.15	АС-150/24	3.90
ТЭЦ-2 – Елизово	39.286	АС-150/24	2.59
ТЭЦ-2 – КСИ	19.695	АС-150/24	1.30
ТЭЦ-2 – Завойко	11.07	АС-150/24	0.73
ТЭЦ-2 – ТЭЦ-1	7.91	АС-150/24	0.52
ТЭЦ-1 – Завойко	7.5	АС-120/19	0.62
ТЭЦ-1 – Зеркальная	10.11	АС-150/24	0.67
ТЭЦ-1 – Океан	3.39	АС-150/24	0.22
Океан – Центральная	3.781	АС-150/24	0.25
Центральная – Зеркальная	3.156	АС-150/24	0.21
Зеркальная – Дачная	5.235	АС-150/24	0.35
КСИ – Дачная	6.647	АС-150/24	0.44
КСИ – Елизово №1	24.234	АС-150/24	1.60
КСИ – Елизово №2	23.88	АС-150/24	1.58
Елизово — Чайка-1	37.538	АААС Z177	2.25
Елизово — Чайка-2	37.537	АААС Z177	2.25
Елизово – Авача №1	7.86	АС-150/34	0.54
Елизово – Авача №2	7.76	АС-150/24	0.51
Авача — Зеленовские озерки	17.539	АС-120/19	2.25
Авача — Приморская №1	22.55	АС-150/24	1.49
Авача — Приморская №2	22.93	АС-150/24	1.51

сопротивления этой части энергосистемы была построена её схема в онлайн-приложении <http://www.falstad.com/circuit/> и получены значения доли ГИТ, проходящего через подстанцию, при подаче ГИТ через ПС «Авача» и ПС «Елизово». Коэффициенты деления тока для обоих вариантов для близко расположенных подстанций показаны в табл. 3 (для остальных они составляют менее 0.05). Как видно из данных в таблице, через подстанцию при обоих вариантах затекания ГИТ проходит не более его третьей части. Поэтому эффекты ГИТ будут сильнее проявлены на концах длинных ЛЭП: Мутновской ГеоЭС, ПС «Мильково», где ГИТ не делится между несколькими подстанциями.

Таблица 2

**Характеристики трансформаторов 220 и 110 кВ на подстанциях
Центрального энергорайона [Central Power District 110 and 220 kV power
transformer characteristics]**

Подстанция	Трансформатор	R_T , Ом	R_{ES} , Ом
Мутновская ГеоЭС	ТРДН-40000/230-У1 (2 шт)	5.6	1.47
	Авача	АТДЦТН-63000/220ВМУ1	1.4
	ТДТН-40000/110У1(откл)	0.8	0.63
Елизово	ТДТН-25000/110/35/10 (3 шт)	1.5	0.75
Мильково	ТДТН-16000/110/35/10	2.6	2.43
Апача	ТДН-10000/110 У-1	7.95	3.33
Кавалерская	ТДТН-40000/110-У1	0.8	2.13
КСИ	ТРДН-25000/110/10 (2 шт)	2.54	0.79
	ТДН-40000/110-УХЛ	1.4	
Дачная	ТДН-16000/110/10 (2 шт)	4.38	0.87
	ТРДН-25000/110/10	2.54	
Зеркальная	ТРДН-40000/110	1.4	1.06
	ТРНДЦН-40000/25000/110/6	1.4	
Центральная	ТДН-10000/110/6	7.95	1.50
	ТДН-16000/110/6	4.38	
Океан	ТДТН-10000/110/6 (2 шт)	5	1.17
Завойко	ТДН-10000/110 У1	7.95	1.66
	ТМНС-10000/110-ХЛ1	7.95	
Зеленовские озерки	ТДН-40000/110/10	1.46	2.24
Сосновка	ТМН-6300/110/6	14.7	1.07
	ТДТН-10000/110/35/6 (2 шт)	5	
Советская	ТДТН-10000/110/6 (2 шт)	5	1.42
Приморская	ТДТН-16000/110/6 (2 шт)	2.6	1.22
Крашенинникова	ТДТН-25000/110/6 (2 шт)	1.5	1.13

Таблица 3

Доля ГИТ, проходящая через подстанцию, при его протекании через
ЛЭП «Мутновская — Авача» I_{ES}/I_1 и «Развилка — Елизово» I_{ES}/I_2 []

Подстанция	I_{ES}/I_1	I_{ES}/I_2
Авача	0.235	0.230
Елизово	0.210	0.334
Сосновка	0.172	0.168
КСИ	0.063	0.061
Советская	0.058	0.056
Зеленовские озерки	0.057	0.056

О выборе передаточной функции

Модель однородной проводимости, упоминавшаяся выше, не учитывает особенностей геолого-геофизического строения литосферы на территории Камчатки. Отмечается, что применение такой модели приводит к ошибкам в расчётах во время быстрых геомагнитных вариаций, таких как SSC [11]. Как известно, распределение удельного электрического сопротивления ($УЭС$) земной коры на Камчатке довольно неоднородно. В [23] обсуждаются результаты построения трёхмерной геоэлектрической модели для Южной Камчатки. В целом до глубины около 50 км наблюдается рост $УЭС$ примерно от 100 Ом·м до 3000 Ом·м. На этом фоне выделяются различные аномалии проводимости, связанные с разломами, зонами сейсмичности, вулканическими камерами, астеносферными выступами.

Для глубинных разломов (например, для Вилючинского) характерно сопротивление 300–500 Ом·м. Проводящий Петропавловский разлом под Начикинским грабеном аппроксимируется блоком шириной 10 км и мощностью 30 км с меньшим на порядок сопротивлением $\rho = 25$ Ом·м. На глубинах 60–80 км глубинные разломы упираются в проводящий астеносферный выступ с $УЭС$ 10 Ом·м. Выделяются также аномалии проводимости, связанные с вулканическими камерами и флюидной активностью. В Южно-Камчатском прогибе на глубине 13–15 км выделены проводники с $\rho = 5–10$ Ом·м, связанные с вулканизмом Горелого и Мутновского вулканов. Срединный Камчатский выступ на глубине 80 км подстилается низкоомным блоком с $\rho = 10$ Ом·м, а под Петропавловским разломом на глубине 40 км выделен проводящий блок с $\rho = 40$ Ом·м. Также необходимо учитывать, что до глубин в первые километры в динамику геоэлектрического поля может давать вклад океан, который имеет $УЭС$ 0.3 Ом·м.

Однако параметры трёхмерной модели, опубликованной в [23], к сожалению, нам недоступны. В качестве первого приближения был проведен расчёт в приближении одномерной модели распределения $УЭС$. Для расчёта передаточной функции использовалась информация о удельном электрическом сопротивлении подстилающих пород из атласа, описанного в [24]. Распределение $УЭС$ на трёх различных глубинах на исследуемой территории показано на рис. 1. Как видно из распределения на глубине 3.2–6.4 км, в данном атласе кристаллические породы описываются очень обобщённо, на уровне различий континентальной и океанической коры, небольшой участок которой находится в правом нижнем углу рис. 1в. Несмотря на заметные латеральные различия $УЭС$, хорошо видимы на рис. 1а и 1б, было решено для первых оценок ограничиться одномерной моделью. Рассчитывались средние $УЭС$ в прямоугольнике, охватывающем ЛЭП (показаны на рис. 1) на глубинах 0–0.1; 0.1–0.2; 0.2 – 0.4; 0.4 – 0.8; 0.8 – 1.6; 1.6 – 3.2; 3.2 – 6.4; 6.4 – 12.8; 12.8 – 25.6; 25.6 – 51.2; 51.2 – 100 км. Полученный глубинный профиль $УЭС$ показан на рис. 2а. Относительно низкие $УЭС$ до 1.6 км отражают наличие чехла осадочных пород (который выклинивается в горной местности), а понижение $УЭС$ глубже 12 км вызвано снижением сопротивления кристаллических пород при повышении температуры с глубиной.

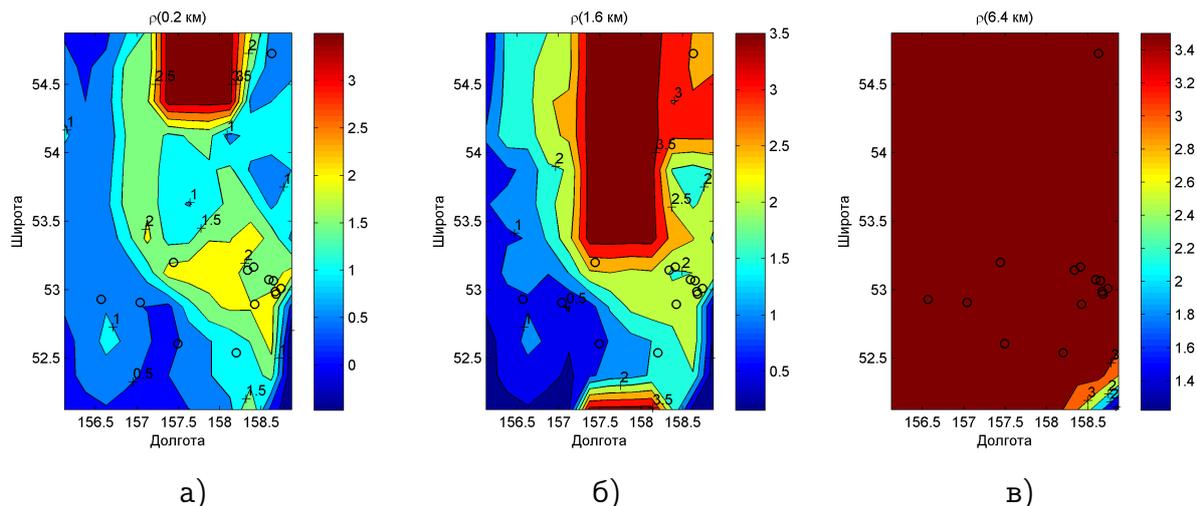


Рис. 1. Распределение логарифма УЭС земной коры на охваченной моделированием территории на разных глубинах: а) 0.1-0.2 км, б) 0.8–1.6 км, в) 3.2-6.4 км. Маркерами показано расположение основных подстанций [Figure 1. The rocks resistivity logarithm distribution at different depth: а) 0.1-0.2 km, б) 0.8–1.6 km, в) 3.2-6.4 km. Markers show basic substation location]

Согласно [19] расчёт передаточной функции при одномерной модели распределения УЭС производится на основе рекуррентного соотношения, связывающего передаточную функцию n -го слоя толщиной l_n и УЭС ρ_n с передаточной функцией более глубоко расположенного слоя

$$K_n = \eta_n \frac{K_{n+1} (1 + e^{-2k_n l_n}) + \eta_n (1 - e^{-2k_n l_n})}{K_{n+1} (1 - e^{-2k_n l_n}) + \eta_n (1 + e^{-2k_n l_n})}, \quad (4)$$

где $\eta_n = \sqrt{i2\pi f \rho_n / \mu_0}$, $k_n = \sqrt{i2\pi f \mu_0 / \rho_n}$. Передаточная функция нижнего слоя, считающегося однородным и полубесконечным, определяется формулой (2). В результате пересчёта, начинающегося с нижнего слоя, был получен набор передаточных функций для каждого слоя. В дальнейшем для расчётов геоэлектрического слоя в формуле (1) использовалась передаточная функция приповерхностного слоя K_1 . Зависимость её модуля от частоты показана на рис. 2б. Также там показана передаточная функция для самого глубокого слоя, среднее УЭС которого равно 100 Ом·м.

Результаты расчётов

Был произведён расчёт геоэлектрического поля, напряжений на ЛЭП Центрального энергорайона Камчатского края и ГИТ в них во время бури 10–11 мая 2024 г., которая была самой сильной за последние 20 лет (планетарный индекс геомагнитной активности достиг значения $K_p=9$). На рис. 3 показаны вариации северной N и восточной D составляющих ГМП 11 мая 2024 г., их спектр, а также расчётный спектр геоэлектрического поля и вариации его компонент. Сравнение

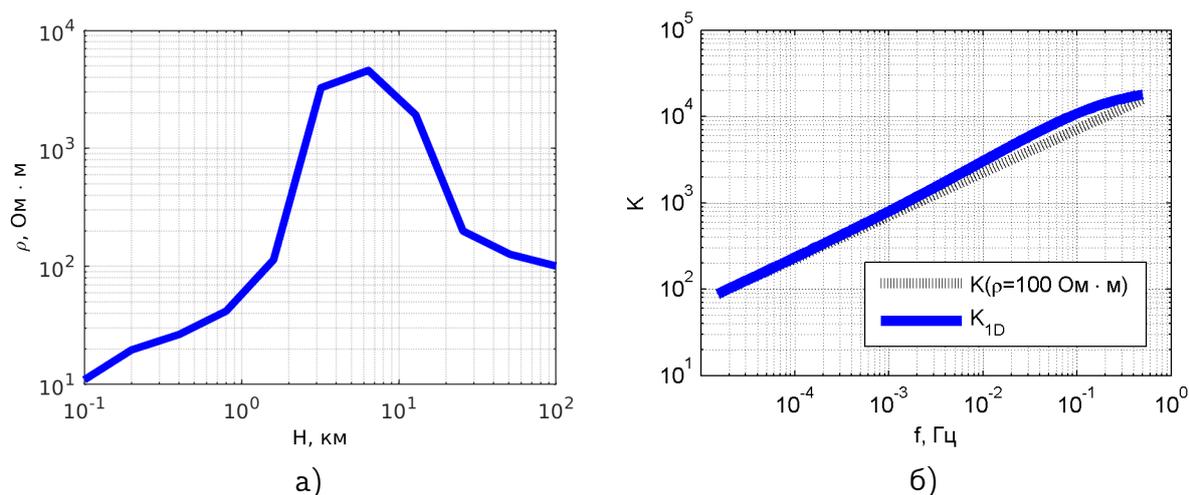


Рис. 2. а) Зависимость усредненного УЭС от глубины, б) зависимость передаточной функции от частоты, сплошной кривой показана зависимость для передаточной функции верхнего слоя, пунктирной — для наиболее глубокого с УЭС 100 Ом·м

[Figure 2. a) The dependence of the average electrical resistivity on the depth, b) the dependence of the transfer function on frequency, a solid curve shows the dependence for the transfer function of the upper layer, dotted — for the deepest with resistivity of 100 Ohm·m]

показывает, что наклон спектра ГМП гораздо больше, т. к. при умножении на передаточную функцию, размах значений которой составляет два порядка (см. рис. 2б), снижается размах значений спектральной плотности мощности: для геоэлектрического поля он составляет три порядка, в то время как для геомагнитного — пять.

Из рис. 3 видно, что размах вариаций обеих горизонтально ориентированных компонент ГМП превысил 600 нТл, а напряжённость геоэлектрического поля достигала 90 мВ/км. Отметим, что это относительно невысокие значения — в авроральной зоне могут наблюдаться поля напряжённостью в единицы и даже десятки В/км. Тем не менее, в результате действия этого поля напряжение на ЛЭП 110 кВ «Апача — Елизово» превысило 8 В (см. рис. 4), а на ЛЭП 220 кВ «Мутновская ГеоЭС — ПС Авача» — 5 В. Из рис. 4 видно, что вариации напряжения на широтно-ориентированной ЛЭП «Апача — Елизово» связаны с вариациями северной Н-компоненты ГМП, а вариации напряжения на сориентированной вдоль меридиана ЛЭП «Мутновская ГеоЭС — ПС Авача» определяются в основном скоростью изменения восточной D-компоненты ГМП. Подобную ориентацию, но большую длину (301 км) имеет ЛЭП 110 кВ «Елизово — Мильково», напряжение на ней около 12:36 UT достигало 14 В. Это повышение напряжения возникло при росте D-составляющей ГМП во время интенсивного бухтообразного возмущения, предположительно связанного с авроральной активностью.

При напряжении на ЛЭП в единицы и десятки вольт и их собственном сопротивлении в единицы — десятки Ом можно ожидать протекания ГИТ величиной порядка 1 А. Действительно, расчёты ГИТ в ЛЭП «Мутновская геотермальная электростанция — ПС «Авача» показали наличие таких токов. Результаты расчётов приведены на рис. 5. Из него видно, что ГИТ в ЛЭП 220 кВ «Мутновская ГеоЭС — ПС «Авача» и ЛЭП 110 кВ «Елизово — Мильково», ориентированных вдоль меридиана, принимает примерно одинаковые значения, их максимум составляет около 1 А. Это связано с более высоким сопротивлением ЛЭП и концевых трансформаторов на ПС «Мильково». Выше уже отмечалось, что на ГИТ в этих ЛЭП влияют в основном вариации D-компоненты, т.к. ЛЭП ориентированы вдоль меридиана.

В широтно-ориентированной ЛЭП 110 кВ «Апача — Елизово» (длина 153.8 км) вариации ГИТ определяются скоростью изменения Н-составляющей ГМП, максимальная величина ГИТ в линии 1.5 А наблюдалась около 07:49 УТ на фоне быстрого падения поля при бухтообразном возмущении. В заземленной нейтрали силового трансформатора на ПС «Апача» ГИТ частично компенсировался ГИТ в линии «Апача — Кавалеровская» и достиг в это время значения 1.3 А.

Для оценки степени воздействия ГИТ на концевые трансформаторы ЛЭП были рассчитаны значения коэффициента намагничивания сердечника (core magnetization coefficient) [25], который равен отношению напряженности поля Н, создаваемого в сердечнике ГИТ, к полю H_x , создаваемым током холостого хода, и для трёхфазных трёхстержневых трансформаторов определяется отношением ГИТ I_{01} к току холостого хода I_x и коэффициентом асимметрии фаз КА

$$СМС = \frac{H}{H_x} = \frac{I_{01}}{3I_x} КА, \quad (5)$$

Например, для фазы В $КА = 2 - I_{xB}/I_{xA} - I_{xB}/I_{xC}$. Расчёты показали, что при $КА = 0.2$, $I_{01} = 1А$ для трансформатора ТДТН-16000/110, находящегося на ПС «Мильково», коэффициент намагничивания сердечника принимает значение $СМС=0.08$, что говорит о заметном, но не критическом влиянии ГИТ на силовой трансформатор. Скорее всего, в результате действия ГИТ наблюдалось увеличение уровня чётных гармоник в ЛЭП, но увеличение реактивной мощности вследствие подмагничивания сердечника было незначительным. Ток 1.3 А на ПС «Апача» при токе холостого хода силового трансформатора ТДН-10000/110 $I_x = 0.37А$ создаёт более сильный эффект: $СМС=0.24$, который всё же недостаточен для заметного увеличения реактивной мощности. Результаты расчётов СМС при $КА = 0.2$ для наиболее подверженных ГИТ подстанций приведены в табл.4. Как видим, эффект действия более значителен на концевых подстанциях, особенно, если мощность трансформатора относительно невелика, и соответственно, не слишком велик ток холостого хода. В случае параллельной работы нескольких трансформаторов, как на Мутновской ГеоЭС и ПС «Елизово», ГИТ делится между ними, и эффект кратно ослабевает. Наконец, ГИТ, приходящий в Елизово, делится между множеством близко расположенных подстанций, и это также снижает эффект его действия.

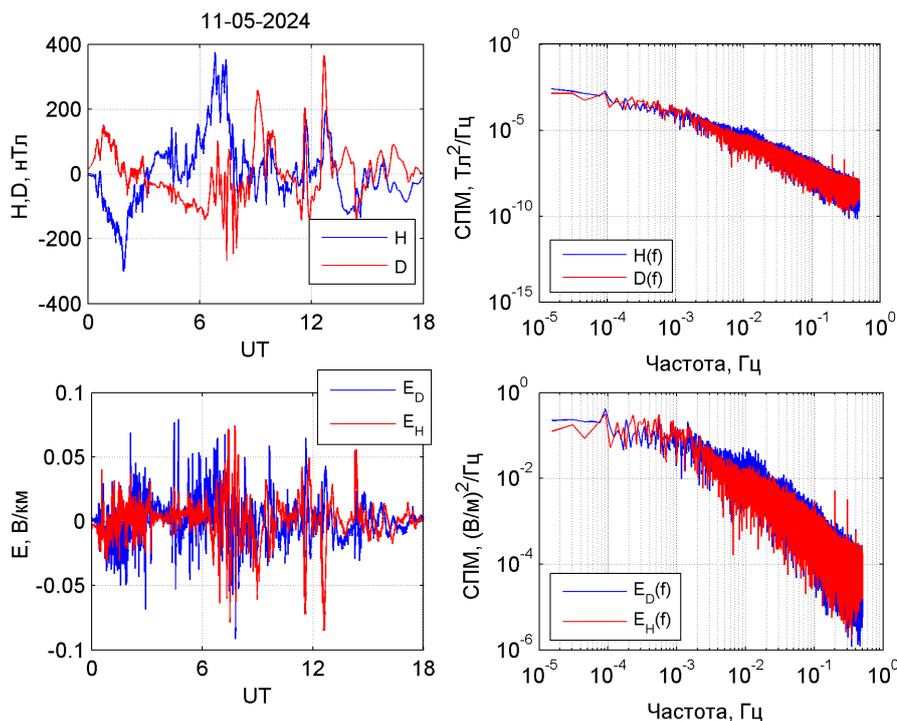


Рис. 3. Вариации горизонтально-ориентированных компонент ГМП 11 мая 2024 г. по данным Геофизической обсерватории «Паратунка» (верхняя левая панель), их спектры (верхняя правая панель) и вариации компонент расчётного геоэлектрического поля (нижняя левая панель) и их спектры (нижняя правая панель)

[Figure 3. Variations of the horizontally oriented components of the geomagnetical field on May 11, 2024 according to the Geophysical observatory «Paratunka» (upper left panel), their spectra (upper right panel) and variations of the components of the calculated geoelectric field (lower left panel) and their spectra (lower right panel)]

Таблица 4

Оценка воздействия ГИТ на силовые трансформаторы при $KA=0.2$ [GIC effect on transformer estimation]

Подстанция	Трансформатор	I_x, A	I_{max}, A	СМС
Апача	ТДН-10000/110 У-1	0.37	1.310	0.24
Мильково	ТДТН-16000/110	0.84	0.961	0.08
Мутновская ГеоЭС	ТРДН-40000/220 (2)	1.10	1.121	0.03
Елизово	ТДТН-25000/110 (3)	0.92	0.475	0.01

Заключение

Произведено моделирование геоэлектрического поля, напряжений на линиях электропередачи ЛЭП и геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в ЛЭП Центрального энергорайона энергосистемы Камчатского края во время экстремальной магнитной бури 10-11 мая 2024 г. При расчёте использована

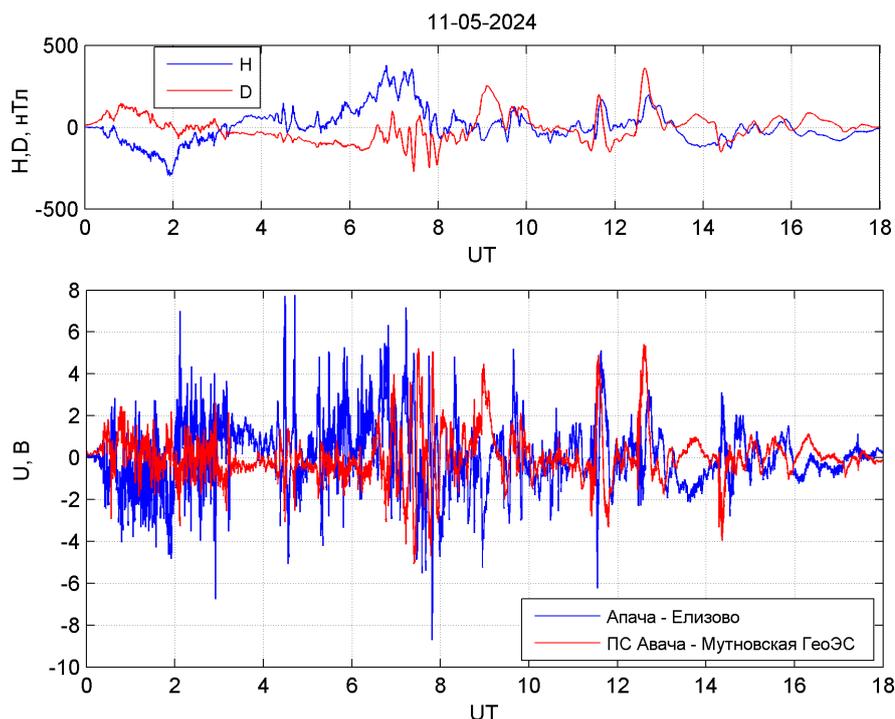


Рис. 4. Вариации компонент ГМП (верхняя панель) и расчётных напряжений на ЛЭП (нижняя панель) 11 мая 2024 г.

[Figure 4. Variations of geomagnetical field components (upper panel) and calculated voltages at the power lines (lower panel) on May 11, 2024]

одномерная модель распределения удельного электрического сопротивления литосферы на территории Камчатки со средним удельным электрическим сопротивлением около 100 Ом·м. При расчёте электрической схемы энергорайона учтены длины и ориентации ЛЭП, сопротивления первичных обмоток трансформаторов на подстанциях, их количество, а также эффект растекания ГИТ по близко расположенным подстанциям.

Показано, что амплитуда ГИТ во время бури могла достигать 1 А в ЛЭП 220 кВ «Мутновская ГеоЭС — ПС Авача» и ЛЭП 110 кВ «Елизово — Мильково», ориентированных вдоль меридиана, и 1.5 А в ЛЭП 110 кВ «Апача — Елизово», ориентированной в широтном направлении. Оценка воздействия ГИТ на силовые трансформаторы показала, что наибольшее воздействие ожидается на ПС «Апача»: напряжённость генерируемого ГИТ в магнитопроводе магнитного поля составила 24 % от напряжённости рабочего магнитного поля. Такое воздействие неопасно для трансформатора, но может вызывать генерацию чётных гармоник.

Благодарности Авторы благодарны инженеру лаборатории робототехники Горно-Алтайского университета Учайкину Е.О. за обсуждение материалов статьи и заместителю директора филиала «Камчатскэнерго» «Центральные энергетические сети» Малышеву Д.О. за полезные замечания по методике расчётов.

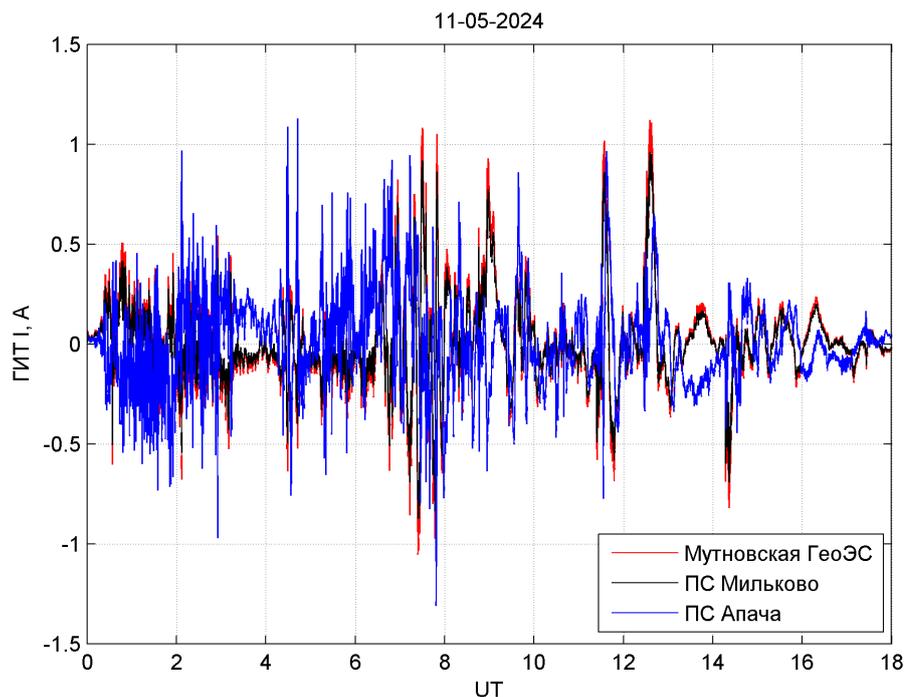


Рис. 5. Вариации расчётного ГИТ в ЛЭП 220 кВ «Мутновская ГеоЭС – ПС «Авача», на подстанциях 110 кВ «Мильково» и «Апача» 11 мая 2024 г.

[Figure 5. Variations of calculated geomagnetically-induced current in 220 kV «Mutnovskaya geothermal power plant - Avacha substatio» power line and in Milkovo and Apacha 110 kV power substation on May 11, 2024]

Аббревиатуры

ГИТ	геомагнитно-индуцированные токи
ГМП	геомагнитное поле
ЛЭП	линия электропередачи
ПС	подстанция
SSC	внезапное начало магнитной бури

Список литературы

1. Пилипенко В. А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы, *Солнечно-земная физика*, 2021. Т. 7, №3, С. 72-110 DOI: 10.12737/szf-73202106.
2. Gaunt C. T., Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk. 2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, Switzerland, 2007, pp. 807-812 DOI: 10.1109/PCT.2007.4538419.
3. Gil A., Berendt-Marchel M., Modzelewska R., Siluszyk A., Siluszyk M., Wawrzaszek A., Wawrzynczak A. Review of geomagnetically induced current proxies in mid-latitude European countries, *Energies*, 2023. vol. 16, pp. 7406. DOI: 10.3390/en16217406.
4. Mac Manus D. H., Rodger C. J., Dalzell M., Thomson A. W. P., Clilverd M. A., Petersen T., et al. Long-term geomagnetically induced current observations in New Zealand: Earth return corrections and geomagnetic field driver, *Space Weather*, 2017. vol. 15, no. 8, pp. 1020–1038 DOI: 10.1002/2017SW001635.

5. Barbosa C. S., Hartmann G. A., Pinheiro K. J. Numerical modeling of geomagnetically induced currents in a Brazilian transmission line, *Advances in Space Research*, 2015. vol. 55, no. 4, pp. 1168–1179 DOI: 10.1016/j.asr.2014.11.008.
6. Hübert J., Beggan C. D., Richardson G. S., Gomez-Perez N., Collins A., Thomson A. W. P. Validating a UK geomagnetically induced current model using differential magnetometer measurements, *Space Weather*, 2024. vol. 22, no. 2, e2023SW003769 DOI:10.1029/2023SW003769.
7. Albert D., Schachinger P., Bailey R.L., Renner H., Achleitner G. Analysis of long-term GIC measurements in transformers in Austria, *Space Weather*, 2022. vol. 20, no. 1, pp. e2021SW002912 DOI: 10.1029/2021SW002912.
8. Zhang J. J., Wang C., Sun T. R., et al. GIC due to storm sudden commencement in low-latitude high-voltage power network in China: Observation and simulation, *Space Weather*, 2015. vol. 13, pp. 643–655 DOI:10.1002/2015SW001263.
9. Watari S., Nakamura S., Ebinara Y. Measurement of geomagnetically induced currents (GIC) around Tokyo, *Earth, Planets and Space*, 2021. vol. 73, pp. 102 DOI: 10.1186/s40623-021-01422-3.
10. Marsal S., Torta J. M., Curto J. J., Canillas-Pérez V., Cid O., Ibañez M., Marcuello A., Validating GIC modeling in the Spanish power grid by differential magnetometry, *Space Weather*, 2021. vol. 19, no. 12 DOI:10.1029/2021SW002905.
11. Caraballo R., González-Esparza J. A., Pacheco C. R., Corona-Romero P. Improved model for GIC calculation in the Mexican power grid, *Space Weather*, 2023. vol. 21, no. 10, e2022SW003202 DOI:10.1029/2022SW003202R.
12. Espinosa K. V., Padilha A. L., Alves L. R., Schultz A., Kelbert A. Estimating geomagnetically induced currents in southern Brazil using 3-D Earth resistivity model, *Space Weather*, 2023. vol. 21, no. 4, e2022SW003166 DOI: 10.1029/2022SW003166.
13. Matandirotya E., Cilliers P. J., Van Zyl R. R. Modeling geomagnetically induced currents in the South African power transmission network using the finite element method, *Space Weather*, 2015. vol. 13, pp. 185–195 DOI: 10.1002/2014SW001135.
14. Švanda M., Smičková A., Výbošťoková T., Modelling of geomagnetically induced currents in the Czech transmission grid, *Earth Planets and Space*, 2021. vol. 73, no. 1, pp. 229 DOI: 10.1186/s40623-021-01555-5.
15. Селиванов В. Н., Аксенович Т. В., Билин В. А., Колобов В. В., Сахаров Я. А. База данных геоиндуцированных токов в магистральной электрической сети «Северный транзит», *Солнечно-земная физика*, 2023. Т. 9, № 3, С. 100-110 DOI: 10.12737/szf-93202311.
16. Sakharov Ya. A., Yagova N. V., Bilin V. A., Selivanov V. N., Aksenovich T. V., Pilipenko V. A. Parameters influencing the efficiency of generation of geomagnetically induced currents by nonstorm Pc5-6/Pi3 geomagnetic pulsations, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2024. vol. 88, no. 3, pp. 289-295 DOI: 10.1134/S1062873823705421.
17. Sivokon V. P. A New method for detecting geomagnetically induced currents, *Russian Electrical Engineering*, 2021. — vol. 92, no. 11, pp. 685–690 DOI: 10.3103/S1068371221110146.
18. Uchaikin E. O., Gvozdarov A. Y. Organization of monitoring of even harmonics amplitudes in the electricity networks of the Altai Republic as an indicator of space weather, 2023 / 2023 IEEE XVI International scientific and technical conference “Actual problems of electronic instrument engineering” (APEIE), (Novosibirsk, Russian Federation, 2023), pp. 450-454 DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347597.
19. Boteler D. H., Pirjola R. J. Numerical calculation of geoelectric fields that affect critical infrastructure, *International journal of geosciences*, 2019. vol. 10, pp. 930–949 DOI:10.4236/ijg.2019.1010053.
20. Gvozdarov A. Yu., Kazantzeva O. V., Uchaikin E. O., Yadagaev E. G. Estimation of geomagnetically induced currents in the Altai republic power system according to the Baygazan magnetic station data, *Bulletin KRASEC. Physical and mathematical sciences*, 2023. vol. 45, no. 4, pp. 190-200 DOI: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-190-200.
21. *Схема и программа развития энергетики Камчатского края на 2023–2027 годы*, Официальный сайт Правительства Камчатского края <https://kamgov.ru/minzkh/shema-i-programma-razvitiia-energetiki-kamchatskogo-kraa>.
22. *Провода для высоковольтных воздушных линий электропередачи компактированные типа Z марки АААС-Z*. Углич: ООО "Ламифил", 2024. 67 с.
23. Белявский В. В., Алексанова Е. Д. Трехмерная геоэлектрическая модель южной части полуострова Камчатка, *Физика Земли*, 2014. № 1, С. 11-32 DOI:10.7868/S0002333714010025.

24. Alekseev D., Kuvshinov A., Palshin N. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications, *Earth, Planets and Space*, 2015. vol. 67, pp. 108 DOI:10.1186/s40623-015-0272-5.
25. Uchaikin E., Gvozдарев A., Kudryavtsev N. Assessment of the geomagnetically induced currents impact on the power transformers cores of the Altai Republic 110 kV power grid, *E3S Web of Conferences*, 2024. vol. 542, pp. 02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202454202002.

Информация об авторах



Гвоздарев Алексей Юрьевич ✉ – к.т.н., доцент, старший научный сотрудник, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия,  ORCID 0000-0002-0196-4712.

Сивоконь Владимир Павлович ✉ – д.т.н., главный научный сотрудник, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка Камчатского края, Россия,  ORCID 0000-0002-3661-7964



Хомутов Сергей Юрьевич ✉ – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, и.о. зав. Геофизической обсерватории «Паратунка», Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка Камчатского края, Россия 
ORCID 0000-0002-6231-7041

References

- [1] Pilipenko V. A. Space weather impact on ground-based technological systems, *Solar-Terrestrial Physics*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 68-104. DOI: 10.12737/stp-73202106
- [2] Gaunt C. T., Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk. 2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, Switzerland, 2007, pp. 807-812. DOI: 10.1109/PCT.2007.4538419
- [3] Gil A., Berendt-Marchel M., Modzelewska R., Siluszyk A., Siluszyk M., Wawrzaszek A., Wawrzynczak A. Review of geomagnetically induced current proxies in mid-latitude European countries, *Energies*, 2023, vol. 16, pp. 7406. DOI: 10.3390/en16217406
- [4] Mac Manus D. H., Rodger C. J., Dalzell M., Thomson A. W. P., Clilverd M. A., Petersen T., et al. Long-term geomagnetically induced current observations in New Zealand: Earth return corrections and geomagnetic field driver, *Space Weather*, 2017, vol. 15, no. 8, pp. 1020–1038. DOI: 10.1002/2017SW001635
- [5] Barbosa C. S., Hartmann G. A., Pinheiro K. J. Numerical modeling of geomagnetically induced currents in a Brazilian transmission line, *Advances in Space Research*, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 1168–1179. DOI: 10.1016/j.asr.2014.11.008
- [6] Hübert J., Beggan C. D., Richardson G. S., Gomez-Perez N., Collins A., Thomson A. W. P. Validating a UK geomagnetically induced current model using differential magnetometer measurements, *Space Weather*, 2024, vol. 22, no. 2, e2023SW003769. DOI:10.1029/2023SW003769
- [7] Albert D., Schachinger P., Bailey R. L., Renner H., Achleitner G. Analysis of long-term GIC measurements in transformers in Austria, *Space Weather*, 2022, vol. 20, no. 1, e2021SW002912. DOI: 10.1029/2021SW002912
- [8] Zhang J. J., Wang C., Sun T. R., et al. GIC due to storm sudden commencement in low-latitude high-voltage power network in China: Observation and simulation, *Space Weather*, 2015, vol. 13, pp. 643–655. DOI:10.1002/2015SW001263
- [9] Watari S., Nakamura S., Ebinara Y. Measurement of geomagnetically induced currents (GIC) around Tokyo, *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73, p. 102. DOI: 10.1186/s40623-021-01422-3
- [10] Marsal S., Torta J. M., Curto J. J., Canillas-Pérez V., Cid O., Ibañez M., Marcuello A., Validating GIC modeling in the Spanish power grid by differential magnetometry, *Space Weather*, 2021, vol. 19, no. 12 DOI:10.1029/2021SW002905
- [11] Caraballo R., González-Esparza J. A., Pacheco C. R., Corona-Romero P. Improved model for GIC calculation in the Mexican power grid, *Space Weather*, 2023, vol. 21, no. 10, e2022SW003202 DOI:10.1029/2022SW003202R
- [12] Espinosa K. V., Padilha A. L., Alves L. R., Schultz A., Kelbert A. Estimating geomagnetically induced currents in southern Brazil using 3-D Earth resistivity model, *Space Weather*, 2023, vol. 21, no. 4, e2022SW003166 DOI: 10.1029/2022SW003166
- [13] Matandirotya E., Cilliers P. J., Van Zyl R. R. Modeling geomagnetically induced currents in the South African power transmission network using the finite element method, *Space Weather*, 2015, vol. 13, pp. 185–195 DOI: 10.1002/2014SW001135.
- [14] Švanda M., Smičková A., Výbošťáková T., Modelling of geomagnetically induced currents in the Czech transmission grid, *Earth Planets and Space*, 2021, vol. 73, no. 1, pp. 229. DOI: 10.1186/s40623-021-01555-5
- [15] Selivanov V. N., Aksenovich T. V., Bilin V. A., Kolobov V. V., Sakharov Ya. A. Database of geomagnetically induced current in the main transmission line «Northern Transit», *Solar-Terrestrial Physics*, 2023, vol. 9, no. 3, pp. 100-110 DOI: 10.12737/szf-93202311 (In Russian).

- [16] Sakharov Ya. A., Yagova N. V., Bilin V. A., Selivanov V. N., Aksenovich T. V., Pilipenko V. A. Parameters influencing the efficiency of generation of geomagnetically induced currents by nonstorm Pc5-6/Pi3 geomagnetic pulsations, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2024, vol. 88, no. 3, pp. 289-295. DOI: 10.1134/S1062873823705421.
- [17] Sivokon V.P. A New method for detecting geomagnetically induced currents, *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, no. 11, pp. 685–690. DOI: 10.3103/S1068371221110146
- [18] Uchaikin E. O., Gvozdarev A. Y. Organization of monitoring of even harmonics amplitudes in the electricity networks of the Altai Republic as an indicator of space weather, In: 2023 IEEE XVI International scientific and technical conference “Actual problems of electronic instrument engineering” (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 450-454. DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347597
- [19] Boteler D.H., Pirjola R. J. Numerical calculation of geoelectric fields that affect critical infrastructure, *International journal of geosciences*, 2019, vol. 10, pp. 930–949 DOI:10.4236/ijg.2019.1010053
- [20] Gvozdarev A. Yu., Kazantzeva O. V., Uchaikin E. O., Yadagaev E. G. Estimation of geomagnetically induced currents in the Altai republic power system according to the Baygazan magnetic station data, *Bulletin KRASEC. Physical and mathematical sciences*, 2023, vol. 45, no. 4, pp. 190-200. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-190-200
- [21] Skhema i programma razvitiya energetiki Kamchatskogo kraja na 2023–2027 gody [Scheme and program of energy development of the Kamchatka Territory for 2023-2027]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, Kamchatka region government, 2023, 432 p. (In Russian <https://kamgov.ru/minzkh/shema-i-programma-razvitiya-energetiki-kamchatskogo-kraja>).
- [22] Provoda dlya vysokovol'tnykh vozdukhnykh liniy elektroperedachi kompaktirovannye tipa Z marki AAAC-Z [Wires for high-voltage overhead power transmission lines, compact type Z of the AAAC-Z brand]. Uglich, Lamifil, 2024, 67 p. (In Russian).
- [23] Belyavskii V. V., Aleksanova E. D. Three-dimensional geoelectrical model of southern Kamchatka, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 9-31. DOI 10.1134/S1069351314010029
- [24] Alekseev D., Kuvshinov A., Palshin N. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications, *Earth, Planets and Space*, 2015, vol. 67, pp. 108. DOI:10.1186/s40623-015-0272-5
- [25] Uchaikin E., Gvozdarev A., Kudryavtsev N. Assessment of the geomagnetically induced currents impact on the power transformers cores of the Altai Republic 110 kV power grid, In: *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 542, pp. 02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202454202002

Information about the authors



Gvozдарев Alexey Yur'evich ✉ – Ph. D. (in Engineering), Senior Researcher, Complex Geophysical observatory "Paratunka Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Russia,

 ORCID 0000-0002-0196-4712.

Sivokon Vladimir Pavlovich ✉ – Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Engineering Sciences, chief science officer, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Kamchatka, Russia,  ORCID 0000-0002-3661-7964



Khomutov Sergey Yur'evich ✉ – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Head of Geophysical Observatory Paratunka, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Kamchatka, Russia,  ORCID 0000-0002-6231-7041

ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-141-157>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 554.510.535



Оценка прогностической эффективности ионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ в Камчатском регионе

А. В. Павлов*

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, с. Паратунка, ул. Мира, 7, Россия

Аннотация. Аномальные изменения параметров, характеризующих состояние ионосферных областей E и F, наблюдаемые перед наступлением сейсмических событий, могут рассматриваться как возможные ионосферные предвестники этих землетрясений. С целью идентификации сейсмоионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений, в работе использованы ежечасные значения параметров $h'Es$, $hmF2$, $fbEs$, $foF2$, которые получены за период 2016–2023 гг. на ионосферной станции вертикального радиозондирования, расположенной в с. Паратунка (52.97° с.ш., 158.24° в.д.). В качестве возможного ионосферного предвестника землетрясений рассматривались отклонения значений комплекса ионосферных параметров от верхней границы диапазона их фоновых значений в течение суточного интервала при условии отсутствия геомагнитных возмущений. Для оценки прогностической эффективности использованы методики А.А. Гусева, Г.М. Молчана, критерий Ханссена-Койпера, а также вычислялась достоверность и надежность предвестника. Оценки прогностической эффективности проводились для землетрясений, произошедших за временной интервал 2016–2023 гг., с магнитудами $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$, глубинами гипоцентров до 100 км и эпицентрными расстояниями до 400 км до места расположения ионосферной станции. Согласно полученным оценкам прогностической эффективности комплекса рассматриваемых ионосферных параметров, прогноз сейсмических событий с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ отличается от случайного угадывания и, следовательно, выявленные ионосферные возмущения могут быть связаны с процессами подготовки землетрясений. Наибольшие значения эффективности прогноза получены для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное радиозондирование, литосфера, землетрясение, предвестник землетрясений.

Получение: 16.10.2024; Исправление: 11.11.2024; Принятие: 18.11.2024; Публикация онлайн: XX.11.2024

Для цитирования. Павлов А.В. Оценка прогностической эффективности ионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ в Камчатском регионе // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т.49. № 4. С. 141-157. EDN: RMYCLN. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-141-157>.

Финансирование. Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2. Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция:  E-mail: pavlov@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Павлов А. В., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



PHYSICS

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-141-157>

Research Article

Full text in Russian

MSC 86A10, 86A15



Estimation of the prognostic efficiency of ionospheric disturbances preceding the occurrence of earthquakes with a magnitude of $M \geq 5.0$ in the Kamchatka region

*A. V. Pavlov**

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

Abstract. Anomalous changes in the parameters characterizing the state of the ionospheric E and F regions observed before the onset of seismic events can be considered as possible ionospheric precursors of these earthquakes. In order to identify seismoionospheric disturbances preceding the onset of earthquakes, the work used hourly values of the $h'Es$, $hmF2$, $fbEs$, $fbEs$ and $foF2$ parameters, which were obtained for the period 2016–2023 at the ionospheric station of vertical radio sounding located in the village of Paratunka (52.97° N, 158.24° E). Deviations of the values of the ionospheric parameter complex from the upper limit of the range of their background values during the daily interval in the absence of geomagnetic disturbances were considered as a possible ionospheric precursor of earthquakes. The methods of A.A. Gusev, G.M. Molchan, the Hansen-Kuiper criterion, and the reliability and validity of the precursor were used to estimate the prognostic efficiency. The prognostic efficiency was estimated for earthquakes that occurred in the time interval 2016–2023, with magnitudes $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$, hypocenter depths of up to 100 km and epicentral distances of up to 400 km to the location of the ionospheric station. According to the obtained estimates of the prognostic efficiency of the complex of ionospheric parameters under consideration, the forecast of seismic events with magnitudes $M \geq 5.0$ and $M \geq 5.5$ differs from random guessing and, therefore, the identified ionospheric disturbances can be associated with the processes of earthquake preparation. The highest values of the forecast efficiency were obtained for earthquakes with magnitudes $M \geq 5.5$.

Key words: ionosphere, vertical radio sounding, lithosphere, earthquake, earthquake precursor.

Received: 16.10.2024; Revised: 11.11.2024; Accepted: 18.11.2024; First online: XX.11.2024

For citation. Pavlov A. V. Estimation of the prognostic efficiency of ionospheric disturbances preceding the occurrence of earthquakes with a magnitude of $M \geq 5.0$ in the Kamchatka region. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 141-157. EDN: RMYCLH. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-141-157>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (Reg. No. NIOKTR 124012300245-2). The work was carried out using data obtained at the unique scientific installation "Seismic infrasound complex for monitoring the Arctic cryolithozone and complex for continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world" (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. Author is solely responsible for providing the final version of the article in print.

*Correspondence:  E-mail: pavlov@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Pavlov A. V., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Последствия землетрясений делают актуальным проведение исследований физических процессов, которые сопровождают подготовку землетрясений на различных фазах, и разработку на их основе методов и средств прогноза. Поиск предвестников землетрясений в таких геофизических оболочках Земли, как атмосфера и ионосфера может быть полезен для краткосрочного (часы-сутки) прогноза сильных сейсмических событий. Как показывают многочисленные исследования, эффекты в ионосфере, связанные с землетрясениями, проявляются как после подземного толчка [1–3], так и до него [4–6]. Возможные физические механизмы связи возмущений в ионосфере, предшествующих землетрясениям, которые можно рассматривать как ионосферные предвестники землетрясений, подробно рассмотрены, в частности, в работах [7–9]. Существующие гипотезы объясняют появление сейсмоионосферных аномалий как следствие проникновения в ионосферу электрического поля и/или акустико-гравитационных волн (АГВ), которые возбуждаются в приземной атмосфере над зоной подготовки землетрясения.

Несмотря на большой объём работ, посвященных исследованию сейсмоионосферных эффектов, проблема идентификации ионосферных предвестников землетрясений пока далека от своего разрешения из-за трудностей однозначной интерпретации ионосферных данных в каждом конкретном рассматриваемом случае. Это связано с тем, что ионосфера отличается большой изменчивостью и подвержена влиянию различных гелиогеофизических факторов, при этом, как правило, сами сейсмоионосферные аномалии невелики по амплитуде, а существенная доля ионосферных аномалий, даже в спокойных геомагнитных условиях, не сопровождается землетрясениями [10]. Более надежным способом идентификации возможного ионосферного предвестника землетрясений является анализ не по какому-то одному прогностическому параметру, а по определенному набору морфологических признаков.

Как показывают результаты, полученные по многолетним наблюдениям на наземных станциях вертикального зондирования ионосферы [11, 12], процессы подготовки сильных землетрясений могут оказывать влияние на частотные и высотные параметры, характеризующие состояние нижней (область E) и верхней (область F) ионосферы. В соответствии с этим, целью данной работы является идентификация ионосферных возмущений в областях E и F по данным станции вертикального зондирования ионосферы, и оценка прогностической эффективности этих ионосферных возмущений для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$ и $M \geq 6.0$, произошедших в Камчатском регионе за 2016–2023 гг.

Методика анализа данных

Существенные изменения в ионосферном слое E_s перед сильными землетрясениями отмечались во многих исследованиях [13–15]: увеличение

вероятности его появления, рост предельной частоты отражения и частоты экранирования, появление диффузных отражений, уменьшение полупрозрачности слоя. Кроме изменения частотных параметров слоя Es, в работах [16, 17] отмечались значимые изменения его действующих высот в период подготовки землетрясений. Спорадические образования появлялись за несколько суток до землетрясения на высотах, превышающих соответствующие медианные значения на десятки километров. Высоко расположенные спорадические слои нередко сопровождаются отклонением значений частотных параметров слоев Es и F2 от своих фоновых значений в течение одного и того же суточного интервала наблюдений [11, 12, 18]. Таким образом, указанные особенности в изменениях параметров ионосферных слоев можно отнести к предполагаемым предвестникам готовящихся землетрясений.

В данной работе в качестве возможных предвестников землетрясений рассматриваются аномальные временные вариации следующих ионосферных параметров:

- $h'Es$ — наименьшая действующая высота спорадического Es-слоя для обыкновенной волны;
- $foEs$ — предельная частота обыкновенной волны спорадического Es-слоя ионосферы;
- $fbEs$ — экранирующая частота обыкновенной волны спорадического Es-слоя ионосферы;
- $foF2$ — критическая частота обыкновенной волны F2-слоя ионосферы;
- $hmF2$ — высота максимума электронной концентрации F2-слоя ионосферы.

Ежечасные значения ионосферных параметров были получены в ходе радиофизических наблюдений, выполненных средствами вертикального радиозондирования ионосферы. Автоматическая ионосферная станция (АИС) вертикального радиозондирования «Парус-А» расположена в с. Паратунка ($\varphi = 52.97^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.24^\circ$ в.д.). Для учета уровня геомагнитной активности в работе использовались значения К-индексов, измеренных на комплексной геофизической обсерватории (ГФО) «Паратунка» ($\varphi = 52.97^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.25^\circ$ в.д.) и ежечасные значения геомагнитного индекса Dst, публикуемые Мировым центром данных по геомагнетизму (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>).

Для определения сейсмоионосферных эффектов в суточных вариациях ионосферных параметров необходимо получить их фоновые распределения. Также при анализе вариаций в ионосфере следует учитывать наличие или отсутствие в рассматриваемый период времени существенных геомагнитных возмущений, которые могут влиять на ионосферу.

Методика идентификации сейсмоионосферных аномалий, применяемая в данной работе, заключается в следующем. Для каждого момента времени суток

t_i для каждого ионосферного параметра $X(t_i)$ на предшествующем интервале длительностью $T_{\text{med}} = 30$ суток вычислялась медиана $X_{\text{med}}(t_i)$. При этом в качестве фона выбирались магнито-спокойные дни и вычисление медианы производилось только по суткам, в которых во всех трехчасовых интервалах значения геомагнитного индекса составляли $K \leq 2$. Для определения меры отклонения от спокойного фонового распределения использовались параметры межквартильных изменений [5, 6]:

$$Y_{\pm}(t_i) = X_{\text{med}}(t_i) \pm 1.5\text{IQR}(t_i)$$

где $X_{\text{med}}(t_i)$ — медиана, рассчитанная по выбранным магнито-спокойным дням, а $\text{IQR}(t_i) = Q_3(t_i) - Q_1(t_i)$ — разность между верхним Q_3 и нижним Q_1 квартилями, вычисленная по этим же суткам с низкой геомагнитной активностью. Значения $X(t_i)$, выходящие за пределы указанной полосы, определялись как возмущенные. В таком случае, «шумовые» полосы Y_{\pm} ограничивают возможные вариации параметров, объясняемые случайными отклонениями с определенной степенью вероятности. Как следует из [19], в случае нормального распределения «ошибки» значений $\Delta X(t_i) = X(t_i) - X_{\text{med}}(t_i)$, величина $1.5\text{IQR}(t_i)$ будет соответствовать примерно двум стандартным отклонениям. Значения $X(t_i)$ под воздействием разных случайных факторов должны колебаться в пределах указанных границ Y_{\pm} с вероятностью 95% или, с другой стороны, вероятность того, что выход значений за границы полосы Y_{\pm} обусловлен чисто случайными факторами, составляет всего 5%. Значения $X(t_i)$, выходящие за пределы «шумовых» полос, относились к аномальным значениям, если длительность такого возмущения по времени составляла не менее полутора часов (с учетом усреднения по трем точкам).

Методика идентификации возможного ионосферного предвестника землетрясений с $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$ и $M \geq 6.0$ на основе комплекса рассматриваемых ионосферных параметров $h'E_s$, foE_s , fbE_s , $foF2$ и $hmF2$, была построена по следующей схеме:

1. На исследуемом временном интервале T идентифицировалось время появления аномальных значений параметра $h'E_s$, выходящих за верхнюю границу Y_+ его фоновых значений, длительностью существования которых была $\Delta t \geq 1.5$ часа.
2. Если в пределах суточного интервала времени ΔT (± 12 часов относительно момента появления аномальных значений $h'E_s$) наблюдалась низкая геомагнитная активность (все трехчасовые значения индекса $K \leq 2$ и $Dst \in [-30 \text{ нТл}; 20 \text{ нТл}]$), то определялось наличие в течение времени ΔT отклонений от верхних границ Y_+ диапазона своих фоновых значений у дополнительных ионосферных параметров foE_s , fbE_s , $foF2$ и $hmF2$.
3. В зависимости от диапазона магнитуд землетрясений, для которых проводилась идентификация ионосферного предвестника, рассматривалось минимальное число дополнительных параметров $n_{\text{доп}}$, аномальные значения

которых наблюдались совместно с аномальными значениями параметра $h'E_s$ в течение временного интервала ΔT . Для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ было установлено минимальное число дополнительных параметров $n_{\text{доп}} = 2$, а для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$ и $M \geq 6.0$ соответственно $n_{\text{доп}} = 3$.

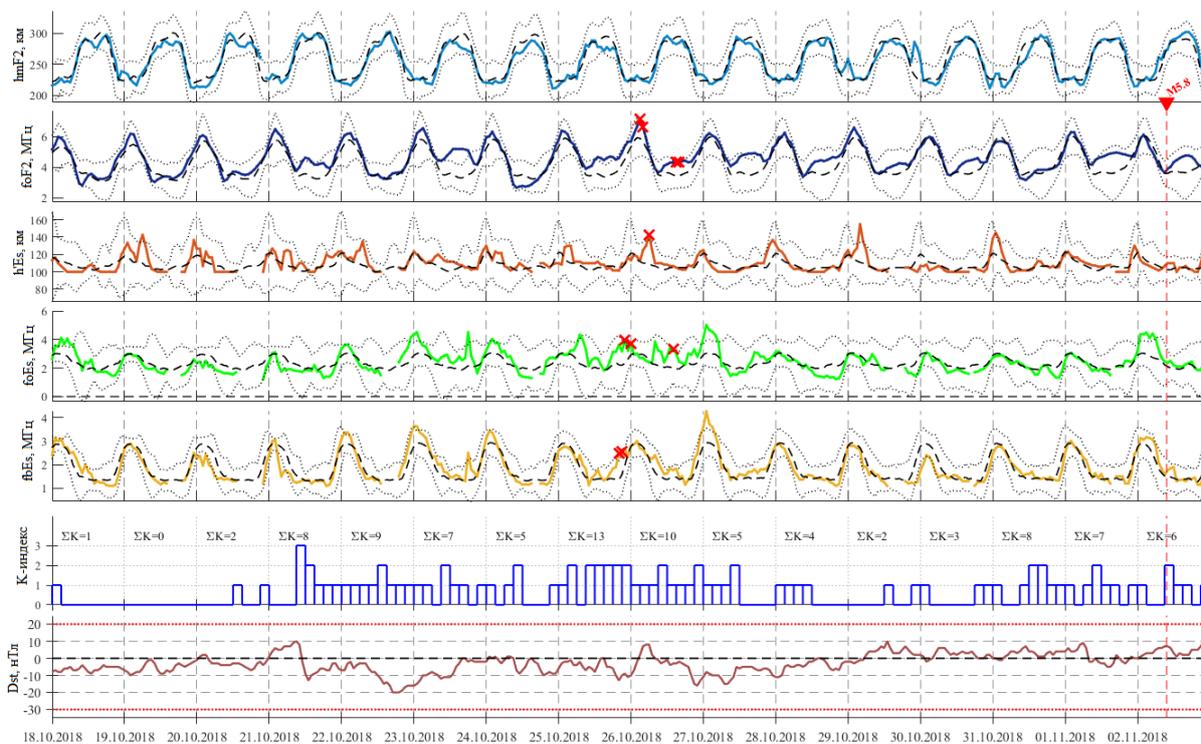


Рис. 1. Временные ряды значений ионосферных параметров $h'E_s$, foE_s , fbE_s , $foF2$, $hmF2$, а также геомагнитных индексов K и Dst , за временной интервал 18.10.2018–02.11.2018 гг. Штриховыми и пунктирными линиями отмечены медианные значения и границы диапазонов фоновых значений ионосферных параметров соответственно. Идентифицированные аномалии отмечены красным маркером 'x'. Землетрясение с магнитудой $M = 5.8$, произошедшее 02.11.2019 г., отмечено на временной оси красным треугольником. [Time series of the ionospheric parameters $h'E_s$, foE_s , fbE_s , $foF2$, $hmF2$, as well as the geomagnetic indices K and Dst for the time interval of 18.10.2018–02.11.2018. Dashed and dotted lines mark the median values and the range boundaries of the background values of the ionospheric parameters, respectively. Identified anomalies are marked with a red marker 'x'. The earthquake with a magnitude of $M = 5.8$ that occurred on 02.11.2019 is marked on the time axis with a red triangle.]

На рис. 1–2, в качестве примера, показаны изменения значений временных рядов рассматриваемых ионосферных параметров, их медианных значений и границ диапазона фоновых значений Y_{\pm} , которые предшествовали наступлению землетрясений.

На рис. 1 представлены значения ионосферных параметров и геомагнитных индексов за временной интервал с 18.10.2018 г. по 02.11.2018 г. Аномальные значения параметров $h'E_s$, foE_s , fbE_s , и foF_2 , превышающие верхние границы фоновых значений, наблюдались 25.11.2018 г. и 26.11.2018 г. в условиях низкой геомагнитной активности. Землетрясение с магнитудой $M = 5.8$, координатами эпицентра $\varphi = 51.98^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.72^\circ$ в.д. и глубиной гипоцентра $h = 72$ км произошло 02.11.2018 09:39:27 (UT) на эпицентральной расстоянии 115 км от места расположения ионосферной станции.

На рис. 2 представлены значения ионосферных параметров и геомагнитных индексов за временной интервал с 01.05.2022 г. по 16.05.2022 г.

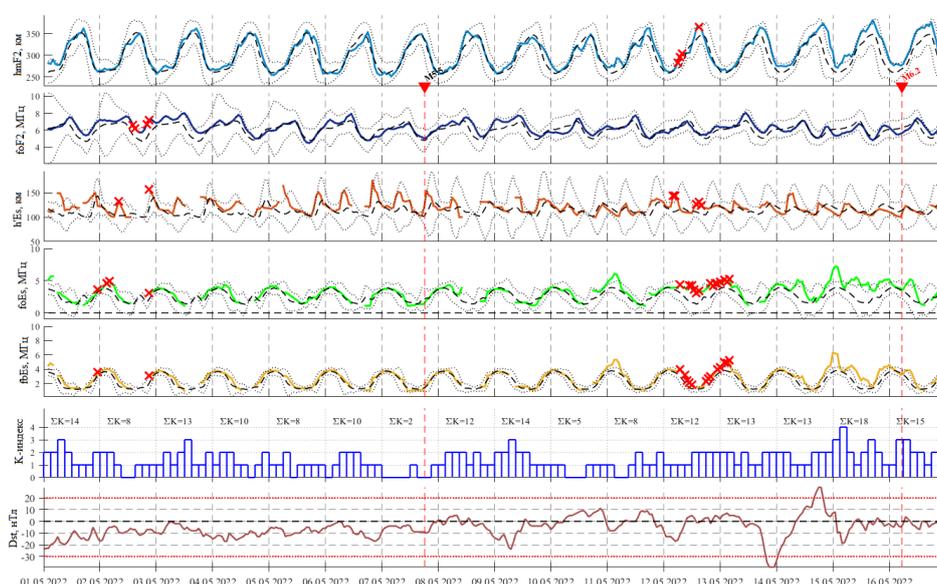


Рис. 2. Временные ряды значений ионосферных параметров $h'E_s$, foE_s , fbE_s , foF_2 , hmF_2 , а также геомагнитных индексов K и Dst , за временной интервал 01.05.2022–16.05.2022 гг. Штриховыми и пунктирными линиями отмечены медианные значения и границы диапазонов фоновых значений ионосферных параметров соответственно. Идентифицированные аномалии отмечены красным маркером 'x'. Землетрясения с магнитудами $M = 5.5$ и $M = 6.2$, произошедшие соответственно 07.05.2022 г. и 16.05.2022 г., отмечены на временной оси красными треугольниками. [Time series of the ionospheric parameters $h'E_s$, foE_s , fbE_s , foF_2 , hmF_2 , as well as the geomagnetic indices K and Dst for the time interval of 01.05.2022–16.05.2022. Dashed and dotted lines mark the median values and the range boundaries of the background values of the ionospheric parameters, respectively. Identified anomalies are marked with a red marker 'x'. Earthquakes with a magnitudes $M = 5.5$ and $M = 6.2$, which occurred on 07.05.2022 and 16.05.2022, respectively, are marked on the time axis with red triangles.]

За этот период в рассматриваемом сейсмоактивном районе произошли два сейсмических события с магнитудами $M = 5.5$ и $M = 6.2$. Аномальные значения параметров $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, и $foF2$, превышающие верхние границы фоновых значений, идентифицированы 01.05.2022 г и 02.05.2022 г. в условиях умеренной геомагнитной активности. Сейсмическое событие с магнитудой $M = 5.5$, координатами эпицентра $\varphi = 54.09^\circ$ с.ш., $\lambda = 163.27^\circ$ в.д. и глубиной гипоцентра $h = 68$ км произошло 07.05.2022 18:13:28 (UT) на эпицентральной расстоянии 355 км от места расположения ионосферной станции. Значения параметров $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, и $hmF2$, превышающие верхние границы фоновых значений, идентифицированы 12.05.2022 г., при этом в течение этих суток значения трехчасового индекса геомагнитной активности были $K \leq 2$, а геомагнитный индекс Dst принимал значения от -17 нТл до 5 нТл. Сейсмическое событие с магнитудой $M = 6.2$, координатами эпицентра $\varphi = 50.34^\circ$ с.ш., $\lambda = 156.55^\circ$ в.д. и глубиной гипоцентра $h = 89$ км произошло 16.05.2022 05:25:50 (UT) на эпицентральной расстоянии 315 км от места расположения ионосферной станции.

С целью оценки прогностической эффективности методики идентификации возможных ионосферных предвестников землетрясений вычислялись следующие параметры: надежность предвестника R , достоверность предвестника V , эффективность предвестника J_G по методике А.А. Гусева, эффективность предвестника J_M по методике Г.М. Молчана, критерий Хансена–Койпера R_{score} .

Надежность предвестника R определяется как отношение количества землетрясений N_+ , для которых был выделен предвестник, к числу всех землетрясений N [20]:

$$R = \frac{N_+}{N}$$

Достоверность предвестника V определяется как отношение числа предвестниковых аномалий $n(A_E)$ к общему числу выделенных аномалий $n(A)$ [20]:

$$V = \frac{n(A_E)}{n(A)}$$

Эффективность прогноза по методике А.А. Гусева [21] вычисляется для конкретной пространственной области и определённого энергетического диапазона землетрясений по формуле:

$$J_G = \frac{N_+/T_{тр}}{N/T}$$

где T — общее время мониторинга сейсмической обстановки; N_+ — количество землетрясений, соответствующих успешному прогнозу за время T ; N — общее количество землетрясений (имеющих пространственно-временные характеристики, аналогичные прогнозируемым), произошедших за время T ; $T_{тр}$ — общее время тревоги (суммарная длительность всех промежутков времени, в которых действовал прогноз по оцениваемому методу в течение общего времени мониторинга). Эффективность J_G показывает, во сколько раз скорость потока спрогнозированных землетрясений превышает среднюю за время наблюдений T , т.е. является отношением вероятности наступления землетрясения

во время тревоги к их средней вероятности наступления. В отсутствие связи «землетрясение–предвестник», т.е. при случайном угадывании, эффективность J_G равна 1.

Эффективность предвестника J_M по методике Г.М. Молчана [22] определяется по формуле

$$J_M = 1 - \nu - \tau$$

где $\tau = T_{тр}/T$ — мера тревоги; $\nu = 1 - N_+/N$ — доля пропусков цели. Для случайного прогноза $J_M = 0$, а для идеального (без пропуска цели и с нулевым временем тревоги) — $J_M = 1$. На диаграммах ошибок строится диагональ $\tau + \nu = 1$, которая соединяет точки (0;1) и (1;0) и соответствует случайному прогнозу. Для этой диагонали строятся доверительные интервалы для различных уровней значимости α . Прогноз на диаграмме отмечается точкой с координатами (τ, ν) . Если точка лежит под нижней границей доверительного интервала, то это можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого предвестника с землетрясениями рассматриваемого энергетического диапазона.

В работах [23, 24] для определения эффективности методов выделения ионосферных предвестников землетрясений из экспериментальных ионосферных данных применялась оценка Ханссена–Койпера R_{score} (Hanssen–Kuipers Score). Величина R_{score} определяется на основе таблицы сопряженности признаков для выбранного интервала наблюдений, в которой дни распределяются в матрице 2×2 согласно своим характеристикам, и задается выражением:

$$R_{score} = \frac{a}{a+b} - \frac{c}{c+d}$$

где a — число дней, в которые произошли землетрясения и был объявлен режим их ожидания; b — число дней, в которые произошли землетрясения, но режим их ожидания не объявлялся; c — количество дней без землетрясений, но с режимом их ожидания; d — количество дней без землетрясений и без режима их ожидания. Данная оценка представляет собой разность между вероятностью обнаружения истинного предвестника землетрясения и вероятностью обнаружения ложного предвестника. Величина R_{score} может принимать значения в диапазоне от -1 до 1 , при этом последнее означает стопроцентную вероятность обнаружения истинного предвестника при отсутствии ложных «тревог».

Результаты анализа прогностической эффективности ионосферных параметров

Оценка прогностической эффективности рассматриваемого комплекса ионосферных аномалий проводилась для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$, произошедших за временной интервал $T = 2016$ – 2023 гг. на глубинах до 100 км и на расстояниях до $r = 400$ км от места расположения станции вертикального радиозондирования ионосферы (географические координаты

$\varphi = 52,97^\circ$ с.ш., $\lambda = 158,25^\circ$ в.д.) на Камчатке. Для анализа использован каталог землетрясений, составленный Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" [25].

Для всех рассматриваемых энергетических диапазонов сейсмических событий, произошедших в исследуемом сейсмоактивном районе, были проведены ретроспективные оценки периодов ожидания $T_{ож}$ их наступления с момента появления аномальных значений ионосферных параметров. Сейсмическое событие считалось спрогнозированным, если происходило в течение периода ожидания $T_{ож}$, объявленного после идентификации комплекса ионосферных аномалий. Если в течение периода ожидания $T_{ож}$ происходило более одного землетрясения прогнозируемого диапазона магнитуд, то спрогнозированным считалось первое из произошедших сейсмических событий, остальные землетрясения считались пропусками «цели». В случае, если землетрясение происходило вне периода ожидания $T_{ож}$, то оно также считалось пропуском «цели». Если в течении периода ожидания $T_{ож}$ не происходило ни одного землетрясения, то идентифицированные прогностические аномалии считались ложными «тревогами».

В таблице 1 для рассматриваемых диапазонов магнитуд землетрясений приведены оценки следующих величин: надежности R ; достоверности V ; числа спрогнозированных землетрясений N_+ ; общего числа N землетрясений, произошедших за время T ; числа аномалий $n(A_E)$ ионосферных параметров, после наступления которых, в течение времени ожидания $T_{ож}$ произошли землетрясения прогнозируемого диапазона магнитуд; общее число $n(A)$ идентифицированных аномалий ионосферных параметров.

Таблица 1

Надежность и достоверность комплекса ионосферных прогностических признаков. [Reliability and validity of a complex of ionospheric prognostic features.]

Магнитуда	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$
N_+	86	26	8
N	165	58	9
$n(A_E)$	86	26	8
$N(A)$	285	102	102
R	0.52	0.45	0.47
V	0.3	0.25	0.08

Полученные оценки показывают, что наибольшая надежность R , равная 0.52 и достоверность V , равная 0.3, получены при прогнозе землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$. Наименьшая надежность прогноза R , равная 0.45, получена для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$. Наименьшая достоверность прогноза V , равная 0.08, получена для землетрясений с магнитудами $M \geq 6.0$.

В таблице 2 для рассматриваемых диапазонов магнитуд сейсмических событий приведены оценки следующих величин: периодов ожидания $T_{ож}$ наступления

землетрясений с момента появления аномальных значений ионосферных параметров; общей длительности мониторинга T ; суммарной длительности всех промежутков времени $T_{\text{тревоги}}$, в которых действовал прогноз; эффективности прогноза J_G по методике А.А. Гусева; уровня статистической значимости α , определяющей вероятность получения значений эффективности J_G в отсутствие связи «землетрясение–предвестник».

Таблица 2

Оценка прогностической эффективности комплекса ионосферных аномалий по методике А.А. Гусева [Estimation of the prognostic efficiency of the complex of ionospheric anomalies using the method of A.A. Gusev]

Магнитуда	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$
$T_{\text{ож}}$ (сутки)	4.22 ± 3.99	7.09 ± 4.83	7.96 ± 5.53
T (сутки)	2922	2922	2922
$T_{\text{тревоги}}$ (сутки)	1149	836	1009
J_G	1.33 ± 0.14	1.57 ± 0.3	1.36 ± 0.48
α	7×10^{-4}	8×10^{-3}	0.3

Для прогнозируемых землетрясений из диапазонов магнитуд $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ оценка эффективности J_G , с учетом значений $\sigma(J_G)$, превышает 1. Наибольшее значение эффективности J_G получено при прогнозе землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$. Наименьшее значение эффективности J_G , с учетом $\sigma(J_G)$, получено при прогнозе землетрясений с $M \geq 6.0$. Полученные оценки эффективности показывают, что прогноз землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ на основе представленного комплекса ионосферных параметров отличается от случайного угадывания.

В таблице 3 и на рисунке 3 представлены результаты оценки прогностической эффективности по методике Г.А. Молчана. На диаграммах ошибок (рисунки 3а,б) точки прогноза (τ, ν) для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ лежат ниже 99% доверительного интервала, что может быть интерпретировано как наличие достаточно надежной связи между идентифицированным комплексом ионосферных аномалий и землетрясениями соответствующих диапазонов магнитуд. Наибольшее значение параметр J_M принимает для диапазона магнитуд $M \geq 5.5$ и равен 0.16.

В таблице 4 представлены результаты проведенной оценки Ханссена–Койпера R_{score} . Для представленных диапазонов магнитуд прогнозируемых землетрясений величина R_{score} принимает положительные значения, которые находятся в интервале от 0.13 до 0.17. Наибольшее значение R_{score} принимает при прогнозе землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$.

Полученные оценки эффективности прогноза для представленной методики на основе анализа аномальных значений пяти ионосферных параметров указывают на наличие связи между идентифицированными ионосферными аномалиями и землетрясениями с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$. Представленная

Таблица 3

Оценка прогностической эффективности комплекса ионосферных аномалий по методике Г.М. Молчана [Estimation of the prognostic efficiency of the complex of ionospheric anomalies using the method of G.M. Molchan]

Магнитуда	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$
J_M	0.128	0.16	0.125
τ	0.39	0.29	0.35
ν	0.48	0.55	0.53

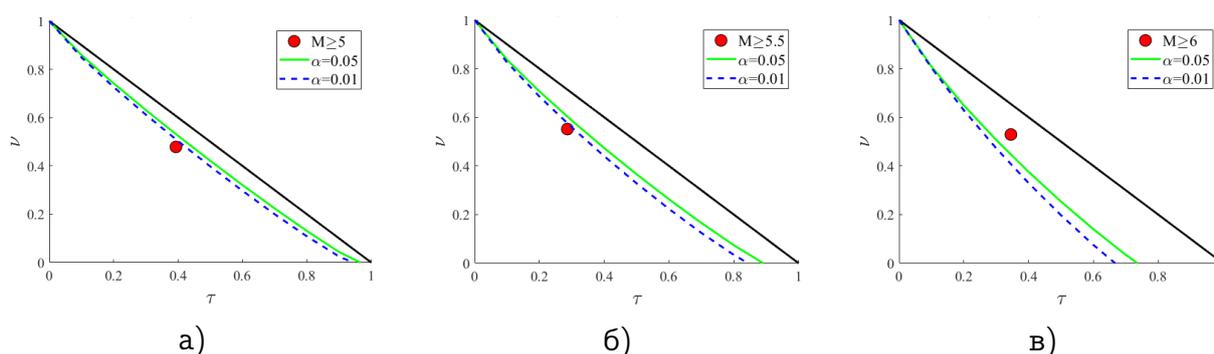


Рис. 3. Диаграммы ошибок для методики идентификации возможного предвестника землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ (а), $M \geq 5.5$ (б), $M \geq 6.0$ (в) на основе комплекса ионосферных прогностических признаков. Доверительные интервалы построены для уровней значимости $\alpha = 0.01$ и $\alpha = 0.05$. [Error diagrams for the method of identifying a possible precursor of earthquakes with magnitudes $M \geq 5.0$ (a), $M \geq 5.5$ (b), $M \geq 6.0$ (c) based on a complex of ionospheric prognostic features. Confidence intervals are constructed for significance levels $\alpha = 0.01$ and $\alpha = 0.05$.].

Таблица 4

Оценка прогностической эффективности комплекса ионосферных аномалий на основе критерия Ханссена–Койпера. [Estimation of the prognostic efficiency of a complex of ionospheric anomalies based on the Hanssen–Kuiper criterion.]

Магнитуда	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$
a	86	26	8
b	79	32	9
c	1063	810	1001
d	1694	2054	1904
R_{score}	0.14	0.17	0.13

методика идентификации возможных ионосферных предвестников землетрясений может быть использована для идентификации периодов увеличения сейсмической активности в Камчатском регионе.

Заключение

Произведена идентификация аномалий ионосферных параметров $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, $foF2$ и $hmF2$, которые могут рассматриваться как возможные предвестники землетрясений. Проведён ретроспективный анализ прогностической эффективности методики на основе комплекса аномальных значений ионосферных параметров для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$ произошедших в Камчатском регионе для за период 2016–2023 гг. на эпицентральных расстояниях до 400 км от пункта ионосферных наблюдений.

Наибольшие значения надежности R и достоверности V для методики на основе комплекса этих ионосферных параметров получены для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$. Было получено, что наступлению 52% землетрясений с $M \geq 5.0$ предшествовал комплекс ионосферных возмущений, при этом в течение 4.22 ± 3.99 суток после 30% выявленных аномалий произошли сейсмические события рассматриваемого энергетического диапазона. Наименьшее значение надежности R получено для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$ и составило 25% землетрясений, которым предшествовал комплекс ионосферных прогностических признаков. Наименьшее значение достоверности V получены для землетрясений с магнитудами $M \geq 6.0$ и составило 8% аномалий, после наступления которых, произошли сейсмические события.

Результаты оценки прогностической эффективности J_G по методике А.А. Гусева показали, что прогноз землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ по комплексу ионосферных параметров отличается от случайного угадывания. Наибольшее значение $J_G = 1.57 \pm 0.3$ получено при прогнозе сейсмических событий с магнитудами $M \geq 5.5$ для периодов ожидания землетрясений 7.09 ± 4.83 суток.

Анализ прогностической эффективности по методике Г.М. Молчана показал, что точки прогноза (τ, ν) для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ лежат ниже 99% доверительного интервала, что может быть интерпретировано как наличие достаточно надежной связи между идентифицированным комплексом ионосферных аномалий и землетрясениями соответствующих диапазонов магнитуд.

Величина R_{score} принимает положительные значения для всех рассмотренных диапазонов магнитуд, т.е. вероятность того, что идентифицированные аномалии ионосферных параметров являются истинным предвестником землетрясений, превышает вероятность того, что они являются ложным предвестником. Наибольшее значение критерий R_{score} принимает при прогнозе землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$ и составляет $R_{score} = 0.17$. Таким образом, представленные оценки эффективности прогноза указывают на наличие связи выявленных ионосферных аномалий с наступившими после их появления землетрясениями с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$.

В тоже время следуют отметить, что достоверность прогноза по представленной методике (доля аномалий после, которых наступили землетрясения) остаётся достаточно низкой и составляет не более 30% для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$. Дальнейшая работа, связанная с повышением достоверности, надежности

и эффективности краткосрочного прогноза землетрясений с $M \geq 5.0$ в Камчатском регионе на основе предложенного подхода может быть осуществлена как за счет расширения перечня ионосферных параметров, рассматриваемых в качестве прогностических признаков, а также разработки для них системы критериев для идентификации аномальных значений, так и привлечением других геофизических параметров, которые могли бы быть отождествлены с предвестниками землетрясений.

Список литературы

1. Davies K., Baker D.M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964, *Journal of Geophysical Research*, 1965. vol. 70, no. 9, pp. 2251–2253.
2. Choosakul N., Saito A., Iyemori T., Hashizume M. Excitation of 4-min periodic ionospheric variations following the great Sumatra-Andaman earthquake in 2004, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009. vol. 114, no. A10, pp. A10313 DOI: 10.1029/2008JA013915.
3. Hegai V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P., Georgieva K. Wave-like perturbations in the ionospheric F2-layer observed after the Ms8.1 Samoa earthquake of September 29, 2009, *Advances in Space Research*, 2011. vol. 47, no. 11, pp. 1979–1982 DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.011.
4. Хегай В. В., Легенька А. Д., Ким В. П., Георгиева К. Ионосферный предвестник разрушительного землетрясения, произошедшего 6 апреля 2009 г. в Л'Аквиле (Италия), *Геомагнетизм и аэронаука*, 2011. Т. 51, № 1, С. 73–79.
5. Хегай В. В., Легенька А. Д., Ким В. П. Аномальное увеличение критической частоты foF2 перед испанским землетрясением 11.05.2011 г., *Геомагнетизм и аэронаука*, 2014. Т. 54, № 1, С. 89–93.
6. Пулинец С. А., Легенька А. Д., Хегай В. В., Ким В. П., Корсунова Л. П. Возмущения ионосферы, предшествующие землетрясениям, по данным наземной станции вертикального зондирования ионосферы WAKKANAI, *Геомагнетизм и аэронаука*, 2018. Т. 58, № 5, С. 713–719.
7. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. *Ионосферные предвестники землетрясений*. М.: Наука, 1992. 304 с.
8. Pulnests S. A., Boyarchuk K. A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin: Springer, 2004. 315 с.
9. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Давиденко Д. В., Дудкин С. А., Цадиковский Е. И. *Прогноз землетрясений возможен?!*. М.: Тривант, 2014. 144 с.
10. Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy, *Annales Geophysicae*, 2010. vol. 28, no. 4, pp. 941–950 DOI: 10.5194/angeo-28-941-2010.
11. Корсунова Л. П., Чистякова Л. В., Хегай В. В. Изменения в ионосфере перед слабыми землетрясениями в регионе Иркутска, *Геомагнетизм и аэронаука*, 2016. Т. 56, № 4, С. 525–534.
12. Корсунова Л. П., Хегай В. В. Возможные краткосрочные предвестники сильных коровых землетрясений в Японии по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы, *Геомагнетизм и аэронаука*, 2018. Т. 58, № 1, С. 94–101.
13. Липеровская Е. В., Похотелов О. А., Олейник М. А., Алимов О. А., Павлова С. С., Хакимова М. Некоторые эффекты в спорадическом слое E ионосферы перед землетрясением, *Физика Земли*, 1994. № 11, С. 86–88.
14. Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.V. Ionospheric phenomena before strong earthquakes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2001. vol. 1, no. 3, pp. 113–118.
15. Корсунова Л. П., Легенька А. Д. Обнаружение возможных краткосрочных ионосферных предвестников сильных землетрясений по изменениям ежесуточных характеристик Es, *Геомагнетизм и аэронаука*, 2021. Т. 61, № 6, С. 803–811.
16. Корсунова Л. П., Хегай В. В. Сейсмоионосферные эффекты сильных коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе, *Геомагнетизм и аэронаука*, 2005. Т. 45, № 5, С. 706–711.
17. Korsunova L.P., Khagai V.V. Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes, *Int. J. Geomagn. Aeron.*, 2006. vol. 6, pp. GI3005 DOI: 10.1029/2005GI000122.
18. Ippolito, A., Perrone, L., De Santis, A., Sabbagh, D. Ionosonde Data Analysis in Relation to the 2016 Central Italian Earthquakes, *Geosciences*, 2020. vol. 10, no. 9, pp. 354 DOI: 10.3390/geosciences10090354.
19. Kotz S., Johnson N. L. *Encyclopedia of Statistical Sciences*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 1983.

20. Салтыков В. А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений, *Физика Земли*, 2017. № 2, С. 84–96.
21. Гусев А. А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности / *Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом Камчатки*. Новосибирск, Наука, 1974, С. 109–119.
22. Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1990. vol. 61, pp. 84–98.
23. Chen Y.I., Liu J.-Y., Tsai Y.B., Chen C.S. Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2004. vol. 15, no. 3, pp. 385–396.
24. Корсунова Л. П., Хегай В. В. Оценка эффективности использования интегральных суточных характеристик Es для выделения краткосрочных ионосферных предвестников сильных землетрясений, *Геомагнетизм и аэрономия*, 2023. Т. 63, № 2, С. 227–237.
25. Чеброва А. Ю., Чемарёв А. С., Матвеев Е. А., Чебров Д. В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции, *Геофизические исследования*, 2020. Т. 21, № 3, С. 66–91 DOI: 10.21455/gr2020.3-5.

Информация об авторе



Павлов Алексей Владимирович ✉
математических наук, научный
космофизических исследований
радиоволн ДВО РАН, с.
 ORCID 0000-0001-5718-1429.

– кандидат физико-
сотрудник, Институт
и распространения
Паратунка, Россия,

References

- [1] Davies K., Baker D.M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28,1964, *Journal of Geophysical Research*, 1965, vol. 70. no. 9. pp. 2251–2253.
- [2] Choosakul N., Saito A., Iyemori T., Hashizume M. Excitation of 4-min periodic ionospheric variations following the great Sumatra-Andaman earthquake in 2004, *Journal of Geophysical Research: Space physics*, 2009, vol. 114, no. A10, p. A10313. DOI: 10.1029/2008JA013915
- [3] Hegai V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P., Georgieva K. Wave like perturbations in the ionospheric F2-layer observed after the Ms8.1 Samoa earthquake of September 29,2009, *Advances in Space Research*, 2011, vol. 47, no. 11, pp. 1979-1982. DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.011
- [4] Khegay V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P., K. Georgieva K. Ionospheric precursor of a destructive earthquake that occurred on April 6, 2009 at L'Aquila (Italy), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2011, vol. 51, no. 1, pp. 73–79 (In Russian).
- [5] Khegay V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P. Anomalous increase in the fof2 critical frequency prior to the spanish earthquake of May 11, 2011, *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2014, vol. 54, no. 1, pp. 89–93 (In Russian).
- [6] Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Khegay V.V., Kim V.P., Korsunova L.P. Ionosphere disturbances preceding earthquakes according to the data of ground based station of the vertical ionospheric sounding WAKKANAI, *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 713–719 (In Russian).
- [7] Liperovskiy V. A., Pokhotelov O. A., Shalimov S. L. Ionosfernye predvestniki zemletryaseniya [Ionospheric precursors of earthquakes]. Moscow, Nauka, 1992, 304 pp. (In Russian).
- [8] Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*, Berlin, Springer, 2004, 315 p.
- [9] Pulinets S. A., Uzunov D. P., Davidenko D. V., Dudkin S. A., Tsadikovskiy E. I. Prognoz zemletryaseniya vozmozhen?! [Earthquake forecast is possible?!]. Moscow, Trovant, 2014, 144 p. (In Russian).
- [10] Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy, *Annales Geophysicae*, 2010, vol. 28, no.4, pp. 941–950. DOI: 10.5194/angeo-28-941-2010
- [11] Korsunova L. P., Khegay V.V. Vozmozhnye kratkosrochnye predvestniki sil'nykh korovykh zemletryaseniya v yaponii po dannym nazemnykh stantsiy vertikal'nogo zondirovaniya ionosfery [Possible short-term precursors of strong crustal earthquakes in Japan based on ground-based vertical ionospheric sounding stations], *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2018, vol. 58, no. 1, pp. 94–101 (In Russian).
- [12] Liperovskaya E.V., Pokhotelov O.A., Oleynik M.A., Alimov O.A., Pavlova S.S., Khakimova M. Some effects in the sporadic E layer of the ionosphere before an earthquake, *Fizika Zemli* 1994, no. 11. pp. 86–88 (In Russian).
- [13] Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.V. Ionospheric phenomena before strong earthquakes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2001, vol. 1, no. 3, pp. 113–118
- [14] Korsunova L. P., Legen'ka A. D. Detection of possible short-term ionospheric precursors of strong earthquakes by changes in daily Es characteristics, *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2021, vol. 61, no. 6, pp. 803–811 (In Russian).
- [15] Korsunova L.P., Khegay V.V. Seismoionosfernye efekty sil'nykh korovykh zemletryaseniya v Tikhookeanskom regione [Seismoionospheric effects of strong crustal earthquakes in the Pacific region], *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2005, vol. 45., no. 5, pp. 706–711 (In Russian).

- [16] Korsunova L.P., Khegai V.V. Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes, *Int. J. Geomagn. Aeron.*, 2006, vol.6, G13005. DOI: 10.1029/2005GI000122
- [17] Ippolito, A., Perrone, L., De Santis, A., Sabbagh, D. Ionosonde Data Analysis in Relation to the 2016 Central Italian Earthquakes, *Geosciences* 2020, vol. 10, no. 9, pp. 354.
- [18] Klotz, S., Johnson, N.L. *Encyclopedia of Statistical Sciences*, Hoboken, John Wiley, 1983.
- [19] Saltykov V.A. On the possibility of using tidal modulation of seismic noise for earthquake prediction, *Fizika Zemli*, 2017, no. 2. pp.84–96 (In Russian).
- [20] Gusev A.A. Prognoz zemletryasenyi po statistike seysmichnosti [Earthquake forecast based on seismicity statistics]. In: *Seysmichnost' i seysmicheskiy prognoz, svoystva verkhney mantii i ikh svyaz' s vulkanizmom na Kamchatke* [Seismicity and seismic forecast, properties of the upper mantle and their relationship with volcanism in Kamchatka]. Novosibirsk, Nauka, 1974, pp. 109–119 (In Russian).
- [21] Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction, *Phys. Earth and Planet. Inter.*, 1990, vol.61, pp. 84–98.
- [22] Chen Y.I., Liu J.-Y., Tsai Y.B., Chen C.S. Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2004, vol. 15, no 3, pp. 385–396.
- [23] Korsunova L. P., Khegay V.V. Evaluation of the efficiency of using integral daily characteristics Es for identifying short-term ionospheric precursors of strong earthquakes. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2023, vol. 63, no. 2, c. 227–237 (In Russian).
- [24] Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V. Unified information system of seismological data in the Kamchatka branch of the Federal Research Center of Geophysical Surveys of the Russian Academy of Sciences: principles of organization, main elements, key functions, *Geofizicheskie issledovaniya*, 2020, vol. 21. no 3. pp. 66–91 DOI: 10.21455/gr2020.3-5 (In Russian).

Information about the author



Pavlov Aleksey Vladimirovich ✉ – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0001-5718-1429.