

Визуальное отображение оценки опасности зон структуры тропических циклонов на основе почти периодического анализа

А.А. Парамонов^{1,А}, А.В. Калач^{2,А,В}

^А МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

^В Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-8504-2108, paramonov_a_a99@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-8926-3151, a_kalach@mail.ru

Аннотация

Предложена визуальная оценка опасности зон структуры тропических циклонов на основе почти периодического анализа. Рассматривается инструментарий визуализации, позволяющий настраивать и отображать как зоны тропических циклонов, радиусы которых кратны найденным характерным почти периодам, так и штриховка межзонального пространства с учётом степени опасности относительно центра циклона.

В качестве основных инструментов использовали модули для визуализации библио-теки matplotlib Circle и Wedge, позволяющие настраивать необходимым образом выявленные структурные зоны по степени их опасности. Данная разработка может быть полезна аварийно-спасательным службам в качестве оперативного диагностического инструмента для поддержки принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций, обусловленных опасными природными явлениями.

Ключевые слова: почти периодический анализ, анализ данных, обработка изображений, тропические циклоны, тайфуны, техносферная безопасность, чрезвычайная ситуация, опасные природные явления, классификация тропических циклонов, оценка безопасности, визуализация.

1. Введение

Визуализация результатов исследований играет важную роль в восприятии и интерпретации полученных данных. В настоящее время достаточно популярными являются методы анализа изображений. Так, в работе [1] приведены результаты исследования эффективности алгоритмов детекции объекта на изображениях низкого качества. Данный вопрос очень важен в контексте, например, телемедицины, для детекции объектов на МРТ-снимках.

В области техносферной безопасности в настоящее время исследователями активно изучаются вопросы, связанные с математическим, численным моделированием и анализом природных климатических явлений, таких как, например, снежные лавины [2] или торнадо [3].

Немалую опасность представляют собой такие природные явления, как тропические циклоны, способные нанести не только непоправимый ущерб инфраструктуре, но и повлечь за собой гибель населения. Для исследования кинетики вихревых потоков Опрышко О.В. в своей работе исследует модель течения газа в природной части торнадо и тропических циклонов [4].

В работе [5] рассмотрен вопрос об исследовании взаимосвязей землетрясений и тропических циклонов. В результате исследования динамик землетрясений и

тропических циклонов, были выявлены характерные временные интервалы, в результате которых при возобновлении активности циклонов вероятность возникновения мощного сейсмического толчка становится максимальной.

Актуальность исследования тропических циклонов для территорий Российской Федерации подтверждается работой Озёровой Н.А. [6], в ходе исследования особенностей эволюции тропических циклонов, которые оказывают своё влияние на погоду Дальнего Востока РФ. Очередным подтверждением может служить, разрабатываемая в рамках программы «Приоритет 2030», система диагностики тропических циклонов на основе спутниковых данных [7].

Прогнозирование развития вихревых структур в своей работе [8] изучает Левина Г.В. Найденные в работе специфические конфигурации вихревой облачности, соответствующие начальной стадии циклогенеза, автором предлагается использовать в оперативной метеодиагностике при анализе спутниковых изображений облачности.

Для отслеживания и наблюдения за тропическими циклонами разработаны методика восстановления интенсивности тропических циклонов по их спутниковым изображениям [9].

Все разработки в области исследования тропических циклонов сопровождаются реализацией программных комплексов с визуализацией обработанных данных [10,11].

Обзор моделей и методов для анализа данных, представленных в виде пространственно-временного процесса, рассматривается в работе. В исследовании формулируется проблема поиска взаимосвязей между многопараметрическими характеристиками, в качестве аргумента которых выступает время и пространство [12].

В данной работе представлена возможность визуальной оценки при помощи программного инструментария языка программирования Python, результатов почти периодического анализа данных фото- и видеорядов динамики тропических циклонов.

Почти период – значения, наиболее близкие к периодам. В общем виде, почти периодической функцией $f(t)$ называется функция, удовлетворяющая условию: $|f(t+\tau)-f(t)| < \varepsilon$, где $\varepsilon > 0$ – смещение, τ – почти период функции $f(t)$.

Почти периодический анализ – анализ данных с упорядоченным аргументом по выявлению зависимостей, близких к периодическим. Использование аппарата почти периодического анализа позволяет проводить выявление критических рубежей изменения тенденций исследуемых данных вне зависимости от априорных предположений.

2. Почти периодический подход анализа изображений тропических циклонов

Обработка и последующий анализ изображений структур тропических циклонов состоит из нескольких шагов. Сперва исходное изображение приводится к чёрно-белому формату, к размеру по умолчанию – 500x500 пикселей. У полученного изображения определяется центр тропического циклона от которого происходит дальнейшее преобразование изображения в полярные координаты. Срезы полученного изображения вдоль значений полярных углов обрабатываются обобщённой сдвиговой функцией (1).

$$a(\tau, \Delta t) = \frac{1}{n - \tau - 2\Delta t} \cdot \sum_{t=1}^{n-\tau-2\Delta t} \left| \ln \left(\frac{y_{t-\Delta t+\tau} \cdot y_{t+\Delta t+\tau}}{y_{t+\tau}^2} \right) - \ln \left(\frac{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}{y_t^2} \right) \right|, \quad (1)$$

где n – общее число отсчётов функции $y(t)$; t – целые положительные и отрицательные числа, включая ноль; Δt – целое положительное число, сдвиг по аргументу; τ – целое положительное число, значения почти периодов.

Локальные минимумы полученной функции, анализируются при различных средах аргумента Δt и выделяются наиболее значимые и совпадающие, являющиеся почти периодами для исследуемого вектора значений. Результаты обработки обобщённых

сдвиговых функций для всех срезов изображения обобщаются и выделяются наиболее встречаемые значения почти периодов, которые характеризуют исследуемое состояние структуры тропического циклона на изображении. Выявленные почти периоды отображаются на изображении кратными окружностями от выявленного центра тропического циклона, выделяя характерные зоны структуры тропического циклона на изображении. Такой подход анализа и визуализации был продемонстрирован в ходе работ [13-15].

Ключевой особенностью данного исследования является дополнение визуализации граничных зон тропических циклонов на основе выявленных почти периодов разметкой колец в соответствии с типом представления опасности.

3. Оценка зон опасности тропических циклонов и используемые инструменты визуализации

При обработке фото- и видеорядов самых крупных тропических циклонов за последние годы, были получены следующие оценки опасных зон структуры тропических циклонов в зависимости от их предполагаемых категорий по шкале Саффира-Симпсона.

Стадии развития тропических циклонов первой и второй категорий показали наличие общих признаков, за счёт чего было получено структурное разделение циклона на следующие диапазоны. Особо опасные зоны тропического циклона находятся от центра урагана, до размеченной окружности с утроенным или учетверённым радиусом, в основе которого лежит найденный характерный почти период. Опасные зоны располагаются за окружностями утроенного или учетверённого радиуса, до окружностей с радиусами, кратными упятерённому или ушестерённому почти периоду, а зоны, расположенные дальше этих окружностей относятся к зонам повышенного наблюдения.

Схожими визуальными признаками обладают и тропические циклоны, находящиеся на стадии развития четвёртой и пятой категорий. Здесь особо опасные зоны тропического циклона находятся от центра урагана, до размеченной окружности с радиусом порядка 110 пикселей. Опасные зоны располагаются до окружностей удвоенного или утроенного радиуса, равного выявленному почти периоду. Зоны, расположенные дальше этих окружностей относятся к зонам повышенного наблюдения.

Тропические циклоны третьей категории опасности по шкале ураганов Саффира-Симпсона могут иметь схожие структурные признаки развития как циклонов второй категории, так и циклонов четвёртой категории. Из-за чего чёткого критерия оценки для них не было сформулировано, а при обработке кадров циклона, который находится на данной ступени развития, происходит ручная настройка параметров, в зависимости от исследуемой структуры.

Для решения задачи отображения только зон, с радиусами, кратными выявленным почти периодам, отлично справлялся модуль `plot` библиотеки `matplotlib` языка программирования `Python`. Данные изображения в чёрно-белом формате представляют собой матрицу пикселей, которые принимают значения от 0 до 255, что позволяет отобразить её с использованием модуля `contourf`, предназначенного для отображения контурного представления данных.

Пример визуализации представлен на рис. 1. На полученной визуализации видно, как от размеченного центра из центра «глаза бури» расставляются окружности, с радиусами, кратными выявленному почти периоду в 81 пиксель.

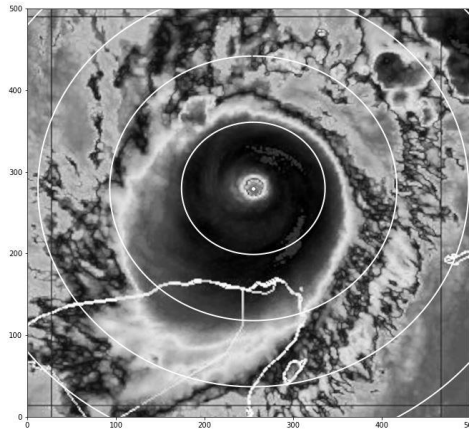


Рис.1. Тропический циклон Милтон, состояние на момент 21:35 по UTC 8.10.24, с размеченными структурными окружностями, кратными почти периоду 81 пиксель

В ходе задачи разметки образованных колец по зонам опасности возникла проблема возможности внесения штриховки на графическую плоскость с изображением возможностями использованного инструментария для визуализации. Решением данной проблемы стал дополнительный раздел визуализаций библиотеки `matplotlib.patches`.

Данный раздел предоставляет набор модулей визуализаций, позволяющих задавать произвольные двумерные области на графике. В данном разделе для решения поставленной задачи, было использовано два программных модуля. Первый – `Circle`, который отображает на плоскости окружность с заданными координатами центра и значения радиуса. Этот модуль применялся для отображения и дальнейшей штриховки зоны окружности радиусом равным почти периоду.

Вторым использованным модулем являлся `Wedge`. Его частое применение – отображение клиновидных фигур с заданным центром и радиусом, охватывающий задаваемые границы по углам разметки. В данном модуле присутствует параметр `width`, который позволяет рисовать частичный клин от внутреннего до внешнего указанного радиуса.

4. Результаты расчётов и их визуализация

Для построения необходимой визуализации в модуль `Circle` подавались значения точки центра тропического циклона на изображении, а модуль `Wedge` был настроен следующим образом. В качестве входных параметров модуль также принимал координаты центра тропического циклона, радиус, размер которого был равен соответствующему значению, кратному выявленному почти периоду. Границы углов разметки структуры были заданы от 0 до 360 градусов, чтобы отображалось кольцо. И в качестве параметра `width` указывалось значение почти периода.

Для заполнения штриховкой зон опасности в модули `Circle` и `Wedge` был подан дополнительный параметр `hatch`, устанавливающий вид отображаемой штриховки. Для обозначения особо опасной зоны была выбрана наклонная штриховка («/»), для обозначения опасной зоны была выбрана штриховка точками или «в горошек» («.»), и для обозначения зоны повышенного наблюдения была выбрана штриховка сеткой («#»).

Для изображения тропического циклона, находящегося, например, на пятой стадии развития и при выявленном почти периоде в 80 пикселей, результатом визуального отображения опасных зон будет являться изображение с рис. 2

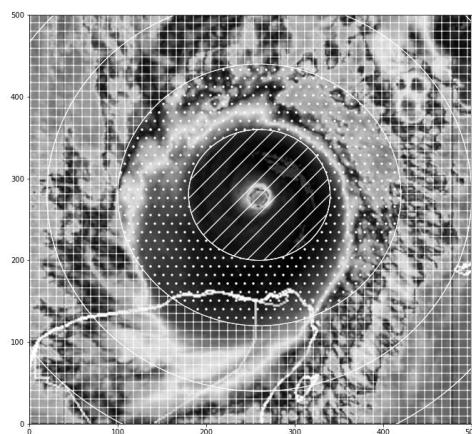


Рис.2. Структурные зоны опасности тропического циклона для почти периода в 80 пикселей и пятой категории опасности тропического циклона по шкале ураганов Саффира-Симпсона

Поскольку в разработанной классификации опасных зон структуры тропических циклонов на изображении в зависимости от выявленных почти периодов границы зон опасностей могут изменяться в зависимости от исследуемого тропического циклона и нечёткости определения уровня его опасности по шкале ураганов Саффира-Симпсона, то предусмотрен функционал дополнительной настройки параметров.

В качестве примера, для охвата возможностей программы, рассмотрим случай с меньшим почти периодом, и если задана третья категория тропического циклона, которая по своим характеристикам может относиться, как к зоне оценок первой и второй категорий, так и к зоне оценок четвёртой и пятой категорий (рис.3).

При изменении параметров таким образом, чтобы нижние границы зон опасности были максимальными, а верхняя граница опасности – минимальной, тогда полученный результат представлен на рис. 4.

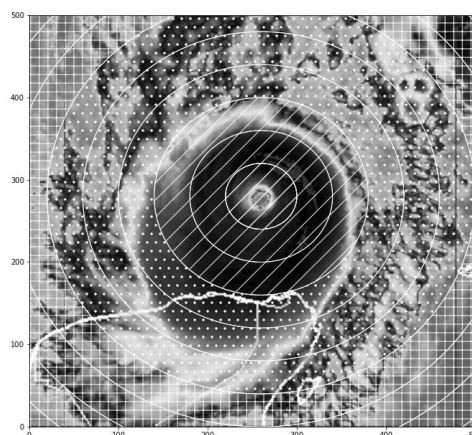


Рис.3. Структурные зоны опасности тропического циклона для почти периода в 40 пикселей и третьей категории опасности тропического циклона по шкале ураганов Саффира-Симпсона

Следует отметить, что при варьировании параметров могут получаться одинаковые случаи разметки зон.

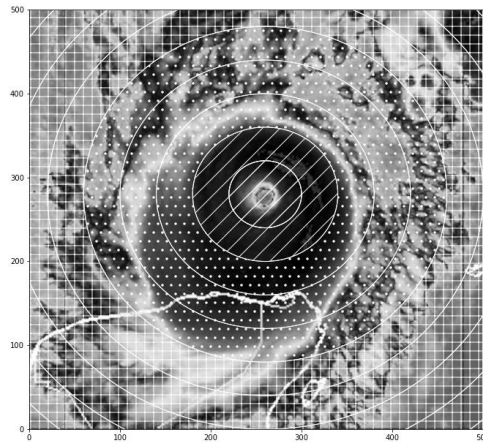


Рис. 4. Структурные зоны с изменёнными настройками по границам зон тропического циклона

Так, если изменим оценку у третьей категории и будем оценивать полученные параметры тропического циклона как тропический циклон 4 уровня, результат совпадёт с данными с рис.4.

Общий функционал программы для обработки и анализа изображений представлен на рис. 5.

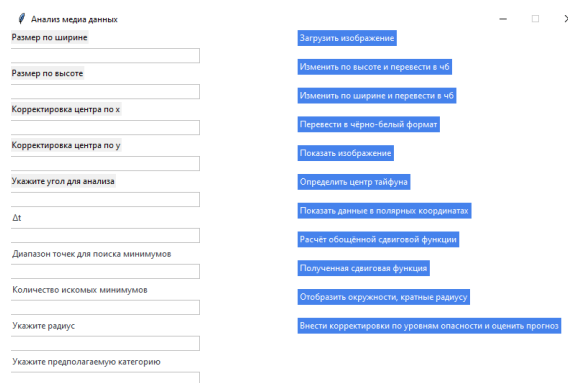


Рис. 5. Окно инструментов для обработки изображения

Реализованный функционал программы позволяет производить загрузку изображений для обработки и анализа из локального окружения компьютера, менять размеры изображения при необходимости. Для удобства обработки и дальнейшего анализа изображения приводится в чёрно-белый формат нажатием кнопки, результаты всех преобразований, произведенных программой можно вывести на экран для просмотра.

Определение центра циклона производится автоматически, при необходимости, предусмотрена ручная настройка для корректировки определяемого центра.

Для выявления почти периодов центрической структуры изображение переводится в полярные координаты и для каждого значения полярного угла рассчитывается функция (1) для значений радиус-векторов, при анализе срезов которой выявляются характерные почти периодические значения радиус-векторов.

После проведения почти периодического анализа для изображений строятся кратные радиусы по найденным почти периодическим значениям и размечаются согласно описанным критериям опасности.

Для развёртывания и применения программы достаточным является наличие компьютера с операционной системой Windows и установленным языком программирования Python 3.9 или выше. Тестирование использования программы на иных операционных системах не проводилось.

Среди ключевых программных пакетов и библиотек для разработки программы с соответствующими возможностями, были использованы следующие. Пакет Tkinter для создания графического пользовательского интерфейса, библиотека pandas для использования математических инструментов, необходимых для обработки и анализа данных. Комплексная библиотека Matplotlib для графических визуализаций, а также пакет multiprocessing для ускорения обработки данных с использованием механизма распараллеливания процессов.

5. Заключение

В результате проведенного исследования предложена визуальная оценка опасности зон структуры тропических циклонов на основе почти периодического анализа.

Рассмотрен инструментарий визуализации, позволяющий настраивать и отображать как зоны тропических циклонов, радиусы которых кратны найденным характерным почти периодам, так и штриховка межзонального пространства с учётом степени опасности относительно центра циклона.

Разработанная программная реализация предлагаемого метода визуализации планируется к подаче на государственную регистрацию программ.

Данная разработка может быть полезны аварийно-спасательным службам в качестве оперативного диагностического инструмента для поддержки принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций, обусловленных опасными природными явлениями.

Список литературы

1. Проворова А. А. Полякова И. Ю., Кузьмичева Е. В. Сравнение эффективности применения различных подходов в задаче детекции объекта на изображении низкого качества // Научная визуализация. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 1-13. – DOI 10.26583/sv.16.3.01.
2. Лентяева Т. В. Программная реализация трехмерной модели динамики снежной массы // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2023. – № 3. – С. 104-111.
3. Чиркунов Ю. А. Пикмуллина Е. О. Математическое моделирование движения частиц газа внутри торнадо // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. – 2023. – № 3. – С. 18-31.
4. Opryshko, O. V. Numerical Simulation of Near-Bottom Parts Of A Tornado And A Tropical Cyclone In A Stationary Case // Journal of Computational and Engineering Mathematics. – 2023. – Vol. 10, No. 1. – P. 30-43. – DOI 10.14529/jcem230104.
5. Головачев С. П., Дубров М. Н., Волков В. А., Александров Д. В., Еремин И. С., Каленов Д. С. Исследование взаимосвязей атмосферы с океаном и литосферой на примере взаимодействия интенсивных тропических циклонов и сильнейших землетрясений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 4. – С. 99-111. – DOI 10.21046/2070-7401-2024-21-4-99-111.
6. Озерова Н. А. Исследование особенностей эволюции тропических циклонов, влияющих на погоду Дальнего востока России // European Journal of Natural History. – 2023. – № 1. – С. 29-34.
7. Приоритет 2030. Система диагностики тропических циклонов. [Электронный ресурс]. URL: <https://2030.dvfu.ru/sistema-diagnostiki-tropicheskikh-cziklonov/> (дата обращения 26.01.2025)
8. Левина Г. В. Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 47-59. – DOI 10.48612/fpg/vaxg-xdmv-11pn
9. Якушева А. Н. Ермаков Д. М. Разработка новой автоматической методики восстановления интенсивности тропических циклонов по данным многоспектральных спутниковых наблюдений Земли с помощью искусственных нейросетей //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 336-349. – DOI 10.21046/2070-7401-2024-21-2-336-349.

10. Варелджян Г. Г., Нарышкина Ю. Н., Дорфман К. В., Алексеев Е. В. Автоматизированная информационная система "WebGis Авиа 1" // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617909 Российская Федерация: № 2022616354

11. Кривоносов М. И., Вершинина О. С., Пирова А. Ю., Канаков О. И. Программный комплекс для построения корреляционных климатических сетей и опенки ассоциации сетевых метрик с положением тропических циклонов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682718 Российская Федерация.

12. Крынецкий, Б. А. Анализ моделей периодических структур пространственно-временных процессов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 04-06 декабря 2023 года. – Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью "Вэлборн", Издательство «Научно-исследовательские публикации», 2024. – С. 497-501.

13. Парамонов А. А., Калач А. В. О возможностях применения метода почти-периодического анализа для обработки изображений // Моделирование систем и процессов. – 2024 – Т. 17, № 3. – С. 44-52. DOI: <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2024-42-50>.

14. Парамонов А. А. Выявление почти-периодических характеристик спутниковых изображений тайфунов в аспекте решения задач техносферной безопасности // Техносферная безопасность. – 2024. – Т. 44, № 3. – С. 71-76.

15. Парамонов А. А., Калач А. В. Моделирование чрезвычайных ситуаций с применением почти-периодического анализа изображений структуры тайфунов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 67-74. – DOI 10.14529/mmph240408.

Visual Display of Tropical Cyclone Structure Zone Hazard Assessment Based on Almost Periodic Analysis

A.A. Paramonov^{1,A}, A.V. Kalach^{2,A,B}

^A MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

^B Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russia

¹ ORCID: 0000-0002-8504-2108, paramonov_a_a99@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-8926-3151, a_kalach@mail.ru

Abstract

A visual hazard assessment of tropical cyclone structure zones based on almost periodic analysis is proposed. We consider a visualization toolkit that allows us to customize and display both tropical cyclone zones whose radii are multiples of the found characteristic near-periods and shading of the interzonal space taking into account the degree of hazard relative to the cyclone center.

As the main tools we used the visualization modules of the matplotlib library Circle and Wedge, which allow us to customize the identified structural zones according to their hazard degree. This development can be useful for emergency-rescue services as an operational diagnostic tool to support decision-making in emergencies caused by natural hazards.

Keywords: almost periodic analysis, data analysis, image processing, tropical cyclones, typhoons, technospheric safety, emergency situation, natural hazards, tropical cyclone classification, safety assessment, visualization.

References

1. Provorova A. A. Polyakova I. Yu. V. Comparison of the effectiveness of different approaches in the task of object detection on a low-quality image // Scientific Visualization. - 2024. - T. 16, № 3. - C. 1-13. - DOI 10.26583/sv.16.3.01.
2. Lentyaeva, T. V. Program realization of the three-dimensional model of the snow mass dynamics // Vestnik of the Voronezh Institute of FSIN of Russia. - 2023. - № 3. - C. 104-111.
3. Chirkunov, Yu. A. Pikmullina, E. O. Mathematical modeling of the snow mass dynamics. O. Mathematical modeling of gas particle motion inside a tornado // Vestnik of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics. - 2023. - № 3. - C. 18-31.
4. Opryshko, O. V. Numerical Simulation of Near-Bottom Parts Of A Tornado And A Tropical Cyclone In A Stationary Case // Journal of Computational and Engineering Mathematics. - 2023. - Vol. 10, No. 1. - P. 30-43. - DOI 10.14529/jcem230104.
5. Golovachev S. P., Dubrov M. N., Volkov V. A., Alexandrov D. V., Eremin I. S., Kalenov D. S. Investigation of Atmosphere-Ocean Interactions. S. S., Kalenov D. S. Investigation of the atmosphere-ocean-lithosphere interrelations on the example of interaction of intense tropical cyclones and the strongest earthquakes // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. - 2024. - T. 21, № 4. - C. 99-111. - DOI 10.21046/2070-7401-2024-21-4-99-111.
6. Ozerova N. A. Study of the peculiarities of the evolution of tropical cyclones affecting the weather of the Russian Far East // European Journal of Natural History. - 2023. - № 1. - C. 29-34.
7. Priority 2030. System of diagnostics of tropical cyclones. [Electronic resource]. URL: <https://2030.dvfu.ru/sistema-dagnostiki-tropicheskikh-ciklonov/> (circulation date 26.01.2025).

8. Levina G. V. Application of the theory of turbulent vortex dynamo for early diagnostics of tropical cyclones nucleation // Fundamental and Applied Hydrophysics. - 2022. - T. 15, № 2. - C. 47-59. - DOI 10.48612/fpg/vaxg-xdmv-11pn
9. Yakusheva, A. N. Ermakov, D. M. Development of a New Automatic Methodology for Tropical Cyclone Intensity Recovery from Multispectral Satellite Earth Observations Data Using Artificial Neural Networks // Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space. - 2024. - T. 21, № 2. - C. 336-349. - DOI 10.21046/2070-7401-2024-21-2-336-349.
10. Vareljyan G. G., Naryshkina Y. N., Dorfman K. V., Alekseev E. V. Automated information system "Web. V. Automated information system "WebGis Avia 1" // Certificate of state registration of computer program No. 2022617909 Russian Federation: № 2022616354.
11. Krivonosov M. I., Vershinina O. S., Pirova A. Yu., Kanakov O. I. Pro-software complex for construction of correlation climatic networks and assessment of the association of network metrics with the position of tropical cyclones // Certificate of state registration of the computer program No. 2022682718 Russian Federation.
12. Krynetsky, B. A. Analysis of models of periodic structures of space-time processes // Actual problems of applied mathematics, computer science and mechanics : proceedings of the International Scientific Conference, Voronezh, December 04-06, 2023. - Voronezh: Limited Liability Company "Valborn", Publishing House "Research Publications", 2024. - C. 497-501.
13. Paramonov A. A., Kalach A. V. On the Possibilities of Application of the Near-Periodic Analysis Method for Image Processing // Modeling of Systems and Processes. - 2024 - T. 17, № 3. - C. 44-52. DOI: <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2024-42-50>.
14. Paramonov A. A. Detection of almost-periodic characteristics of satellite-images of typhoons in the aspect of solving problems of technosphere safety // Technosphere safety. - 2024. - T. 44, № 3. - C. 71-76.
15. Paramonov, A. A. A.; Kalach, A. V. Modeling of emergency situations using almost-periodic analysis of images of the structure of tai-funs // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics. - 2024. - T. 16, № 4. - C. 67-74. - DOI 10.14529/mmph240408.