

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИИ О РЕГУЛЯРНОМ ХАРАКТЕРЕ СТРУКТУРЫ СНЕЖНОЙ ЛАВИНЫ НА ОСНОВЕ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОЧТИ ПЕРИОДОВ

Б.А. Крынецкий, А.В. Калач, А.А. Парамонов

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация
e-mail: a_kalach@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования регулярного характера почти периодов в структуре снежной лавины на примере сошедшей 11 января 2025 года в Альпийских горах снежной массы. Изображение лавины подвергается линеаризации на основе полигональной трансформации целевой области для проведения почти периодического анализа внутри тела схода снежной массы. Полученное прямоугольное представление позволяет выполнять горизонтальные и вертикальные срезы, отражающие продольные и поперечные составляющие компоненты пространственной структуры анализируемого опасного природного явления.

Для решения задачи структурной сегментации применяется почти периодический анализ, определяющий величины длин интервалов единообразного поведения данных. Анализ различных срезов продемонстрировал системный характер ряда продольных и поперечных почти периодов, выражающий фундаментальный вклад в описание структуры тела лавины. Также обнаружены фундаментальные высокочастотные почти периоды, носящие, вероятно, локально выраженные характеристики области.

Полученные результаты позволяют ускорять исследование и сегментирование на основе сформированных априорных представлений о существовании единообразных почти периодов, пронизывающих систему явления на фундаментальном уровне. Это позволит улучшить понимание структур лавин, что способствует совершенствованию мер по обеспечению безопасности лавиноопасных регионов.

Ключевые слова: почти периодический анализ; полигональная линеаризация; анализ данных; обработка изображений; лавины; техносферная безопасность; чрезвычайная ситуация; опасные природные явления.

Введение

С развитием современного туризма и горной промышленности возникает вопрос исследования опасных природных явлений на примере лавин с целью прогнозирования зон ущерба и противодействия их разрушительной силе. Согласно определению, снежные лавины представляют собой массы снега, падающие или движущиеся со скоростью 20–30 м/с. Явление распространено как на территории России [1, 2], так и за границей – например, в Казахстане [3–5] и Турции [6].

Для исследования применяются различные методы и модели – так модель RAMMS демонстрирует удовлетворительные результаты даже в условиях недостатка данных [7, 8]. При этом существенную роль в анализе сыграло зонирование по степеням опасности. Таким образом, вопрос о структурной сегментации лавины показывает свою актуальность в целях улучшения качества прогнозных моделей.

Одним из универсальных методов анализа данных, обладающих упорядоченным аргументом – будь то пространство или время, – является почти периодический анализ [9].

Известно, что метод применим для пространственного сегментирования опасных природных явлений [10, 11]. В работе предлагается оценка системного характера структуры лавины на основе почти периодических характеристик явления.

Описание данных. Исследование проводится на графическом изображении лавины, сошедшей 11 января 2025 года в Альпах на хребте между французской коммуной Ларш (Larche)

и итальянским населенным пунктом Саретто (Saretto) в коммуне Аччельо (Acceglie), взятом с открытого Интернет источника [12].

Лавина сошла слоем толщиной в 15–30 см по поверхности грунта. Критических последствий схода лавины, к счастью, нет – на пути спуска не находились объекты инфраструктуры или туристические группы. Изображение приводится к черно-белой гамме, а для дальнейшего анализа обрабатывается в представлении в виде матрицы, элементы которой описывают интенсивность белого цвета в пикселе строки и столбца приведенного изображения.

Описание методов. Для проведения структурной сегментации лавины в исследовании предлагается применение почти периодического анализа в структуре лавины. Для этого необходимо привести область изображения к спрямлённому виду для представления структуры лавины в виде наборов данных с упорядоченным аргументом.

Преобразование данных основывается на алгоритме полигональной трансформации. В пространстве исходного изображения создаётся сеть узлов полигонов, сопряженных в форме цепочки, описывающей область исследуемого явления. Внутри полигонов с заданными частотами определяются сетки узлов дискретизации преобразованных данных. Для линеаризации выбраны частоты продольной и поперечной дискретизации – 600 и 300 узлов соответственно. Спрямленный набор данных в виде набора горизонтальных и вертикальных срезов – последовательностей упорядоченных по аргументу значений яркости узла дискретизации подвергали почти периодическому анализу для определения существования и синхронизации систем ритмичных тактов в срезах, что позволит провести структурную сегментацию линеаризованного набора и воспроизвести разметку существенных границ в теле исследуемой лавины.

Почти периодический анализ определяет значения, близкие по определению к периоду функции, на основе обобщённой сдвиговой функции – синтезированной из сдвиговой функции и анаморфозы данных, выделяющей колебательную компоненту из единой с трендом структуры.

Исследование почти периодов по различным срезам позволяет систематизировать наблюдения и выявить наиболее существенные характеристики, описывающие данные. Так, рассмотрение ритмичных компонент по поперечному срезу в середине линеаризации приводит к исследованию локальных минимумов сечения обобщенной сдвиговой функции.

Установлено, что анализируемая система локальных минимумов представляет практически идеальную алгебраическую последовательность, что указывает на их фундаментальный характер. Отдельного упоминания заслуживает почти период в 87 узлов дискретизации – он имеет самое малое значение обобщенной сдвиговой функции во всей системе.

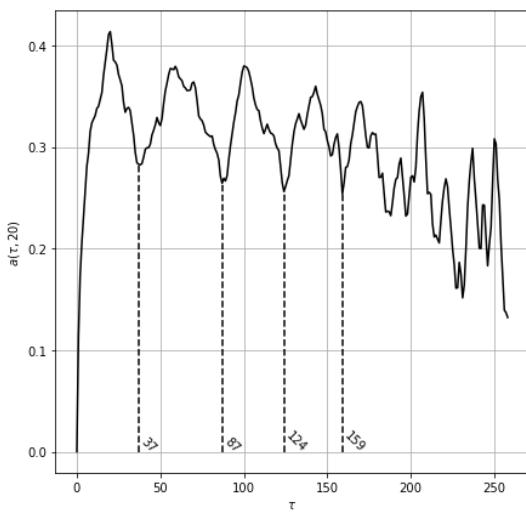


Рис. 1. Сечение обобщенной сдвиговой функции для 250-го поперечного среза линеаризованных данных с разметкой системы локальных минимумов

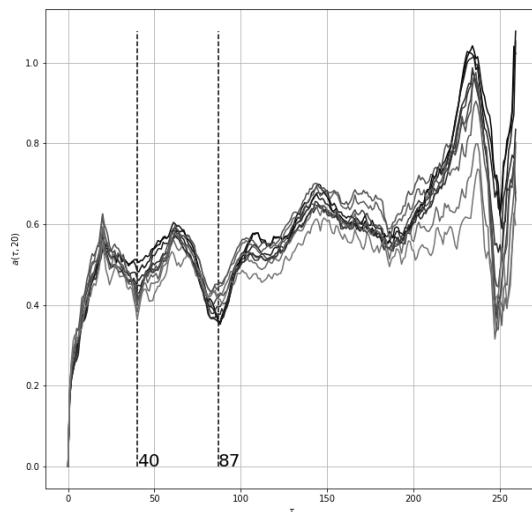


Рис. 2. Сечения обобщенной сдвиговой функции для системы поперечных срезов линеаризованных данных с разметкой системы локальных минимумов

Математика

Для первичной систематизации проведем почти периодический анализ для поперечного сечения линеаризованных данных в 400-й вертикали. Система почти периодов на данном срезе также носит ритмичный характер алгебраической последовательности с шагом, близким к 30 узлам дискретизации. Отдельно необходимо отметить то, что почти период в 87 узлов дискретизации встречается в обеих системах локальных минимумов, что существенно выделяет его и наделяет уже системным характером. Чистое воспроизведение почти периода в 87 узлов дискретизации встречается и в системе локальных минимумов для 250-го вертикального сечения линеаризованных данных, приведенной на рис. 1.

Установлено, что если провести почти периодический анализ в системе первого десятка вертикальных срезов, то система сечений обобщенной сдвиговой функции показывает единообразное поведение (рис. 2).

Рис. 2 убедительно демонстрирует существование пары практически кратных почти периодов в 40 и 87 узлов дискретизации. Также наблюдается подобие локального минимума в окрестностях 185 узлов дискретизации и существенного локального минимума при 250 узлах дискретизации, однако слабая обеспеченность данными позволяет пренебрегать последней четвертью среза. Таким образом, в структуре почти периодов поперечных сечений линеаризованных данных тактовый интервал в 87 узлов дискретизации демонстрирует систематический характер, претендующий на статус фундаментальной составляющей исследуемого явления.

Проведение почти периодического анализа в системе горизонтальных сечений линеаризованных данных позволит оценить продольные почти периоды в структуре. Так, для серединного продольного сечения срез обобщённой сдвиговой функции показывает, что существенные локальные минимумы так же, как и в исследованиях поперечных почти периодов образуют последовательность, схожую с арифметической прогрессией. Помимо существенных локальных минимумов существенно выделяется система ритмичных высокочастотных оврагов, указывающая на неявный фундаментальный малый почти период примерно в 12 узлов дискретизации, однако относительная глубина соответствующего прогиба невелика.

Проведение почти периодического анализа для другого горизонтального среза линеаризованных данных даёт систему ритмичных тактов, в которых явление почти периода в 12 узлов дискретизации носит более явный характер. Его можно зафиксировать в виде последовательности локальных минимумов в 12, 24, 36 и 50 (близко к 48) узлах дискретизации, а существенные локальные минимумы соответствуют 100, 155 и 235 узлам дискретизации.

Особенности полученных срезов обобщенной сдвиговой функции для горизонтальных сечений линеаризованных выражены обилием локальных минимумов, образующих почти строгие алгебраические последовательности с фундаментальным почти периодом в 12 узлов дискретизации. Также можно выделить существенные минимумы, соответствующие трендовому углублению графика среза в 155 и 305 узлах дискретизации.

Таким образом, почти периодический анализ показал системный характер некоторых тактов развития структуры лавины в продольном и поперечном направлениях.

Возникает возможность визуализации структурной сегментации, основан-

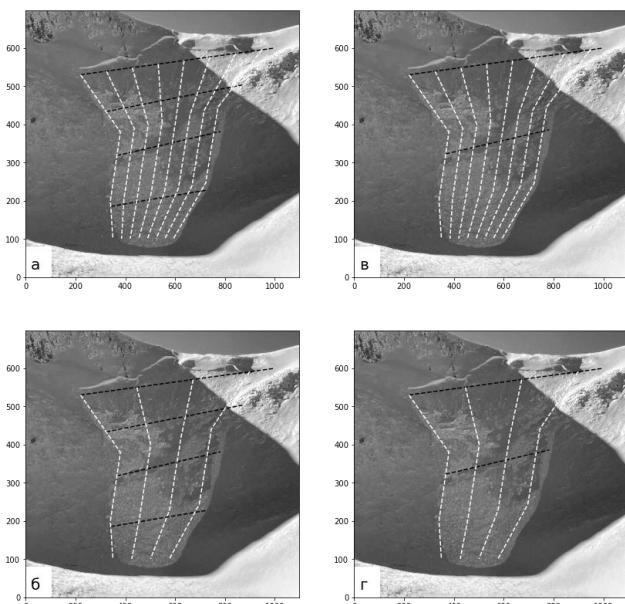


Рис. 3. Комбинации композиций продольных и поперечных почти периодов на исходных данных

ной на определённых регулярных почти периодах. Для демонстрации на рис. 3 рассматриваются композиции продольных почти периодов в 155 и 305 узлов дискретизации и поперечных почти периодов в 40 и 87 узлов дискретизации.

Ритмичные границы приведённой сетки на исходных данных воспроизведены на рис. 3: белые линии определяют поперечные почти периоды, а чёрные – продольные почти периоды соответственно.

На рис. 3 видно, что в строках сохраняется величина поперечного почти периода – так, рис. 3, *a* и *в* имеют ширину синей сетки в 40 узлов дискретизации, а рис. 3, *б* и *г* – ширину синей сетки в 87 узлов дискретизации. Для ширины продольных почти периодов это правило сохранено внутри столбцов – рис. 3, *а* и *б* размечены красными границами с шагом в 155 узлов дискретизации, а рис. 3, *в* и *г* – 305 узлов дискретизации соответственно.

На рис. 3, *б* можно отметить удачную композицию почти периодов, формирующих структуризацию: отдельные области разграничиваются практически по идеальным цветовым сегментам – то есть высветленные области «турбулентного» характера строго отсекаются границами и по продольным, и по поперечным границам.

Рис. 3 показывает, что поперечный почти период в 87 узлов дискретизации делит снежную лавину на три продольные полосы – соответствующие условным трём зонам схода лавины, сошедшей от 2 линий, которые объединились в середине.

Продольный почти период в 305 узлов дискретизации отделяет область начала и развития схода лавины от зоны торможения и окончания пути лавины.

На рис. 4 представлена общая схема алгоритма анализа информации о регулярном характере структуры снежной лавины на основе выявленных почти периодов.

Предложенная схема формирует основу для дальнейшего развития исследований пространственных структур лавин на основе почти периодического анализа.

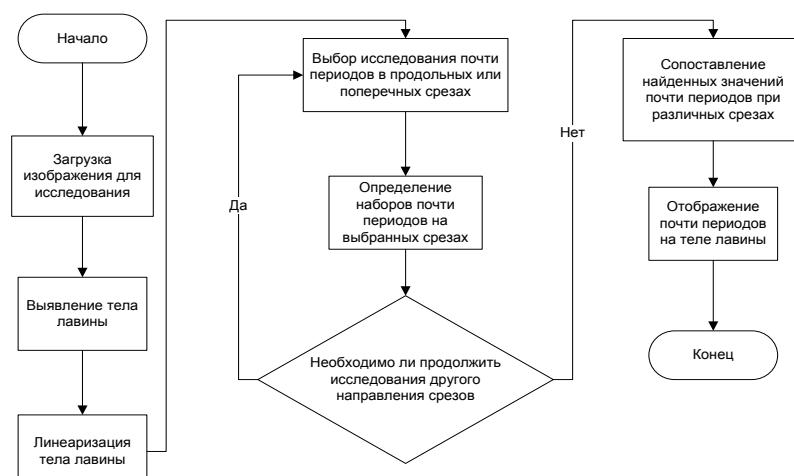


Рис. 4. Схема алгоритма анализа информации о регулярном характере структуры снежной лавины на основе выявленных почти периодов

Выводы

В рамках проведения исследования изображение структуры снежной лавины подвергалась спрямлению с использованием полигональной трансформации для дальнейшего почти периодического анализа снежного потока. Почти периодический анализ позволил установить существование в структуре снежной массы поперечных и продольных ритмичных интервалов развития лавины. Выявленные почти периоды показали системный характер – так, поперечный почти период в 87 узлов дискретизации был устойчиво обнаружен в большом наборе разрозненных срезов. Это указывает на его фундаментальный характер в вопросе описания структуры исследуемой лавины. Полученные результаты показывают единство ритмов структуры развития лавины, что указывает на существенные возможности к пространственной сегментации явления на основе применяемой методики анализа. Проработанный подход может быть интегрирован в системы по мониторингу и прогнозированию лавинной активности в целях поддержки принятия решений по совершенствованию мер обеспечения безопасности и профилактики чрезвычайных ситуаций.

Литература

1. Лавинная опасность на территории всесезонного туристско-рекреационного комплекса «Армхи» (Республика Ингушетия) / Н.В. Кондратьева, А.Х. Аджиев, В.В. Разумов и др. // ГеоРиск. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 52–61.
2. Кондратьева, Н.В. Условия формирования снежных лавин на территории ледниковых комплексов Земегондон и Козидон / Н.В. Кондратьева, А.Х. Аджиев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 11(149).
3. Кужагельдина, Н.У. Анализ состояния проблемы снежного покрова и лавин в горах Иле Алатау / Н.У. Кужагельдина // Студенческая наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей X Международной научно-практической конференции в 2 частях, Пенза, 29 декабря 2022 года. Часть 1. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. – С. 211–215.
4. Применение методов математической статистики для оценки уровня лавинной опасности в горах Иле Алатау / А.Р. Медеу, В.П. Благовещенский, В.В. Жданов, С.У. Ранова // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 8. – С. 34–45.
5. Благовещенский, В.П. Лавинный риск в Казахстане при различных уровнях лавинной опасности / В.П. Благовещенский, В.В. Жданов // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2021. – Т. 3, № 2. – С. 122–132.
6. Ibrahim, G. Avalanche Disaster Review in Turkey / G. Ibrahim // Hydrosphere. Hazard Processes and Phenomena. – 2022. – Vol. 4, no. 4. – P. 310–326.
7. К вопросу моделирования снежных лавин при недостаточности данных / А.С. Турчанинова, С.А. Сократов, Ю.Г. Селиверстов и др. // ГеоРиск. – 2020. – Т. 14, № 1. – С. 38–47.
8. Жукова, Е.Д. Оценка и учет лавинной опасности при развитии курортов (на примере Красной Поляны) / Е.Д. Жукова // Инженерные изыскания в строительстве: Материалы четвертой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов, Москва, 29 апреля 2022 года. – Москва: Геомаркетинг, 2022. – С. 134–139.
9. Парамонов, А.А. Практическая значимость почти-периодического анализа / А.А. Парамонов, Б.А. Крынецкий, Т.Е. Смоленцева // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2024. – Т. 1. – С. 227–230.
10. Калач, А.В. К вопросу анализа метеоданных с упорядоченным аргументом в аспекте решения задач техносферной безопасности / А.В. Калач, А.А. Парамонов, Б.А. Крынецкий // Технологии техносферной безопасности. – 2024. – № 3(105). – С. 170–180.
11. Калач, А.В. О возможностях применения метода почти-периодического анализа для обработки изображений / А.В. Калач, А.А. Парамонов, С.Л. Сахаров // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 44–52.
12. Стоковые изображения, изображения роялти-фри. – URL <https://www.data-avalanche.org/avalanche/1736735650157> (Дата обращения 13.01.2025).

Поступила в редакцию 20 февраля 2025 г.

Сведения об авторах

Крынецкий Борис Алексеевич – аспирант, старший преподаватель кафедры прикладной математики, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0789-5233>; e-mail: kryneckij@mirea.ru.

Калач Андрей Владимирович – доктор химических наук, профессор кафедры прикладной математики, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>; e-mail: a_kalach@mail.ru.

Парамонов Александр Александрович – аспирант, старший преподаватель кафедры прикладной математики, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-2108>, e-mail: paramonov_a_a99@mail.ru.

ANALYSING THE INFORMATION ON THE REGULAR NATURE OF A SNOW AVALANCHE STRUCTURE BASED ON NEAR-PERIODS IDENTIFICATION

B.A. Krynetsky, A.V. Kalach, A.A. Paramonov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

E-mail: a_kalach@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of a study on the regularity of near-periods in the structure of a snow avalanche, using the example of an avalanche that occurred on January 11, 2025 in the Alps. A linearized image of the avalanche was created by transforming the target area into a polygon to conduct a near-period analysis within the body of the avalanche. This representation allowed for the creation of horizontal and vertical slices that reflected the longitudinal and transverse components of the spatial structure of this hazardous natural phenomenon. To solve the problem of structural segmentation, a near-periodic analysis is used. It determines the lengths of intervals with uniform data behavior. Analysis of various slices reveals the systematic nature of longitudinal and transverse near-periods, which contribute to the description of avalanche body structure. The paper also describes the discovered fundamental high-frequency periods, which likely have local characteristics in the region. These results speed up research and segmentation based on an a priori understanding of uniform near-periods that permeate the system at the fundamental level. This improves the understanding of avalanche structures and contributes to safer measures in avalanche-prone areas.

Keywords: Near-periodic analysis; polygonal linearization; data analysis; image processing; avalanches; technosphere safety; emergency situation; hazardous natural phenomena.

References

1. Kondratyeva N.V., Adzhiev A.Kh., Razumov V.V., Zalikhanov M.Ch., Yurchenko N.V. Avalanche hazard on the territory of the all-season tourist and recreational complex "Armkhi" (Republic of Ingushetia). *GeoRisk World*, 2023, Vol. XVII, No. 1, pp. 52–61. DOI: 10.25296/1997-8669-2023-17-1-52-61.
2. Kondrat'eva N.V., Adzhiev A.Kh. Usloviya formirovaniya snezhnykh lavin na territorii lednikovykh kompleksov Zemegondon i Kozidon (Conditions of Snow Avalanche Formation in the Territory of the Zemyegondon and Kozidon Glacier Complexes). *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2024, no. 11(149). DOI: 10.60797/IRJ.2024.149.122.
3. Kuzhageldina N.U. Analiz sostoyaniya problemy snezhnogo pokrova i lavin v gorakh Ile Alatau (Analysis of the State of the Problem of Snow Cover and Avalanches in the Ile Alatau Mountains). *Studencheskaya nauka: Aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v 2 chastyakh, Penza, 29 dekabrya 2022 goda. Tom Chast' 1* (Student Science: Current Issues, Achievements and Innovations: Proc. X International Scientific and Practical Conference in 2 parts, Penza, December 29, 2022. Part 1). – Penza: Nauka i Prosveshchenie Publ., 2022, pp. 211–215. (in Russ.).
4. Medeu A.R., Blagoveshchenskii V.P., Zhdanov V.V., Ranova S.U. Application of Mathematical Statistics to Assess the Avalanche Danger Level in the Ile Alatau Mountains. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2022, no. 8, pp. 34–45. (in Russ.). DOI: 10.52002/0130-2906-2022-8-34-45.
5. Blagoveshchenskiy V.P., Zhdanov V.V. Lavinnyy risk v Kazakhstane pri razlichnykh urovnyakh lavinnoy opasnosti (Avalanche Risk in Kazakhstan at Different Levels of Avalanche Danger). *Hydrosphere. Hazard Processes and Phenomena*, 2021, Vol. 3, no. 2, pp. 122–132. (in Russ.). DOI: 10.34753/HS.2021.3.2.122
6. Ibrahim G. Avalanche disaster review in Turkey. *Hydrosphere. Hazard Processes and Phenomena*, 2022, Vol. 4, no. 4, pp. 310–326. DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.310.

Математика

7. Turchaninova A.S., Sokratov S.A., Seliverstov Yu.G., Petrakov D.A., Lazarev A.V. K voprosu modelirovaniya snezhnykh lavin pri nedostatochnosti dannykh (On the Issue of Modeling Avalanches with Insufficient Data). *GeoRisk*, 2020, Vol. 14, no. 1, pp. 38–47. DOI: 10.25296/1997-8669-2020-14-1-38-47.
8. Zhukova E.D. Otsenka i uchet lavinnoy opasnosti pri razvitiu kurortov (na primere Krasnoy Polany) (Assessment and Accounting of Avalanche Hazards in the Development of Resorts (Using the Example of Krasnaya Polyana)) *Inzhenernye izyskaniya v stroitel'stve: Materialy chetvertoy Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh spetsialistov, Moskva, 29 aprelya 2022 goda* (Engineering Surveys in Construction: Proc. of the Fourth All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Specialists, Moscow, April 29, 2022). Moscow: Geomarketing Publ., 2022, pp. 134–139. (in Russ.).
9. Paramonov A.A., Krynetskiy B.A., Smolentseva T.E. Prakticheskaya znachimost' pochti-periodicheskogo analiza (The Practical Significance of Near-Periodic Analysis). *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* (Proc. of the International Symposium "Reliability and Quality"), 2024, Vol. 1, pp. 227–230. (in Russ.).
10. Kalach A.V., Paramonov A.A., Krynetsky B.A. On the Question of Analysis of Weather Data with an Ordered Argument in the Aspect of Solving Technosphere Security Problems. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*, 2024, no. 3(105), pp. 170–180. (in Russ.). DOI: 10.25257/TTS.2024.3.105.170-180.
11. Kalach A.V., Paramonov A.A., Sakharov S.L. On the Possibilities of Using the Method of Near-periodic Analysis for Image Processing. *Modeling of Systems and Processes*, 2024, Vol. 17, no. 3, pp. 44–52. DOI: 10.12737/2219-0767-2024-42-50.
12. *Stokovye izobrazheniya, izobrazheniya roylati-fri* (Stock Images, Royalty-Free Images). URL <https://www.data-avalanche.org/avalanche/1736735650157>

Received February 20, 2025

Information about the authors

Krynetsky Boris Alekseevich is Post-graduate Student, Senior Lecturer, Department of Applied Mathematics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0789-5233>; e-mail: kryneckij@mirea.ru.

Kalach Andrey Vladimirovich is Dr. Sc. (Chemical), Professor of the Department of Applied Mathematics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>; e-mail: a_kalach@mail.ru.

Paramonov Alexander Alexandrovich is Post-graduate Student, Senior Lecturer, Department of Applied Mathematics, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-2108>, e-mail: paramonov_a_a99@mail.ru.