

Научная статья

УДК 004:005.584.1:502/504; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-40-48

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ПОЧТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

✉ **Калач Андрей Владимирович.**

Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия;

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

Крынецкий Борис Алексеевич.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

Соловьев Александр Семенович.

Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия

✉ a_kalach@mail.ru

Аннотация. Предложен подход к исследованию лавинной опасности территории на основе почти периодического анализа данных, в результате которого образуются интервалы единообразного поведения функции. Эти интервалы разделены равномерно отдалёнными границами, формирующими прямоугольную сетку в пространстве линейризованных данных.

Предложен алгоритм исследования лавинной опасности горной территории, основанный на почти периодическом анализе линейризованных данных, полученных в ходе полигональной трансформации исходного спутникового снимка горного хребта. По результатам применения алгоритма определена композиция равномерных продольных и поперечных интервалов единообразного поведения линейризованных данных, формирующая систему критических пространственных барьеров исходного изображения, определяющих степень лавинной опасности близлежащих территорий.

Ключевые слова: снежная лавина, опасность, почти период, спутниковое изображение

Для цитирования: Калач А.В., Крынецкий Б.А., Соловьев А.С. Исследование лавинной опасности территорий на основе почти периодического анализа спутниковых изображений // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 1 (77). С. 40–48. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-40-48

Scientific article

INVESTIGATION OF AVALANCHE DANGER OF TERRITORIES BASED ON ALMOST PERIODIC ANALYSIS OF SATELLITE IMAGES

✉ **Kalach Andrey V.**

Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia, Voronezh, Russia;

MIREA – Russian technological university, Moscow, Russia.

Krynetsky Boris A.

MIREA – Russian technological university, Moscow, Russia.

Solovyev Alexander S.

Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia, Voronezh, Russia

✉ a_kalach@mail.ru

Abstract. An algorithm for studying the avalanche hazard of a territory based on a nearly periodic analysis of data proposed, which results in intervals of uniform function behavior. These intervals divided by uniformly spaced boundaries that form a rectangular grid in the space of linearized data. An algorithm for studying the avalanche hazard of a mountainous territory proposed, based on a nearly periodic analysis of linearized data obtained during the polygonal

transformation of the original satellite image of a mountain range. Based on the results of applying the algorithm, a composition of uniform longitudinal and transverse intervals of uniform behavior of linearized data is determined, forming a system of critical spatial barriers of the original image that determine the degree of avalanche hazard of nearby territories.

Keywords: avalanche, danger, near period, satellite image

For citation: Kalach A.V., Krynetsky B.A., Solovyev A.S. Investigation of avalanche danger of territories based on almost periodic analysis of satellite images // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 1 (77). P. 40–48. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-40-48

Введение

В последнее десятилетие в мире постоянно фиксируется всевозрастающее количество зимних осадков в виде экстремальных снегопадов, сопровождающихся дождем, что неизменно приводит к образованию нестабильных слоев снега, значительно увеличивающих вероятность схода лавин. Кроме того, быстрое таяние ледников вследствие глобального изменения климата оказывает негативное влияние на стабильность ледниковых озер и силу сцепления снежного покрова, что также ведет к увеличению риска схода лавин [1, 2].

Территория Российской Федерации включает разнообразные климатические зоны и территории, особое внимание среди которых с точки зрения обеспечения безопасности необходимо уделять горной местности. Снежный покров на склонах гор способен терять устойчивость и под действием сил тяжести начинает лавинообразно перемещаться. Основными причинами нарушения устойчивости снежного покрова являются увеличение массы снега до критической величины в результате выпадения осадков и метелевого снеготранспорта и уменьшение удерживающих сил в результате процессов метаморфизма и ползучести снега [3, 4].

Как известно, снежные лавины представляют собой угрозу жизни людей, инфраструктуре и экосистемам в горных районах во всем мире. Необходимо отметить, что развитие туристической активности и хозяйственной инфраструктуры в горной местности напрямую сопряжено с рисками лавинной опасности, что задаёт тренд на повышенный спрос совершенствования методов исследования и прогнозирования лавинной активности. Высокоэффективные методы анализа лавин обеспечат безопасность жизнедеятельности населения и объектов инфраструктуры горных районов.

Традиционно оценку лавинной опасности проводят с использованием методов наземного наблюдения и анализа статистических натуральных данных. При этом необходимо отметить, что использование детерминированных моделей в прогнозировании снежных лавин предполагает наличие значительных объемов данных и вычислительных мощностей. Следует отметить, что статистические модели эффективны с вычислительной точки зрения, однако в значительной степени точность такого прогноза зависит от объема выборки, качества и репрезентативности данных, а экспертные методы настолько субъективны, что могут привести к получению невоспроизводимых результатов в различных регионах [5–7].

Таким образом, исследование взаимосвязей рельефа местности со свойствами снежного покрова и метеорологическими параметрами является актуальной научной задачей, направленной на повышение эффективности прогнозирования возникновения, развития и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций, вызванных сходом лавин.

Методы исследования

Традиционным методом исследования такого сложного многофакторного опасного природного явления, как снежные лавины, служит изучение его в натуральных условиях. Оценка степени лавинной активности и опасности, необходимая для безопасной жизнедеятельности людей и объектов инфраструктуры горных территорий, возможна по результатам мониторинга

эволюции снежных масс. В связи с этим для оценки лавинной опасности особый научный интерес представляет совместное использование последних достижений в области дистанционного зондирования и анализа изображений снежного покрова с использованием методов и инструментария предиктивной аналитики и визуализации аналитических данных.

Поскольку большие массивы данных об опасных природных явлениях по своей природе слабо структурированы и могут быть получены в условиях неполноты и неопределенности информации, то для их эффективного анализа традиционно применяют методы машинного обучения и искусственного интеллекта. При этом следует отметить, что типовой задачей мониторинга и прогнозирования опасных природных явлений является поиск скрытых закономерностей в большом объеме данных, поскольку человек не способен обрабатывать значительный объем поступающих данных за приемлемое время. Эффективный анализ неструктурированных и частично структурированных данных представляет собой сложную задачу, решение которой предполагает использование методов предварительной обработки информации [8–10].

Известно, что по мере увеличения объема, разнообразия и скорости поступления данных растёт и неопределённость, что приводит к снижению точности и достоверности в результатах прогнозирования и обоснованности принимаемых решений. Почти периодический анализ позволяет преодолеть ограничения в обработке данных по времени и пространству и хорошо зарекомендовал себя при интеллектуальном поиске закономерностей, неизвестных взаимосвязей и другой ценной информации в больших данных, которую обнаружить с помощью традиционных инструментов обработки не представлялось возможным.

Однако, как известно, исследование лавинной опасности с использованием аэрофото и космических изображений сопряжено со сложностями, вызванными резкими изменениями яркости и освещенности исследуемых областей горных территорий.

В качестве примера в исследовании использовали фотоснимки горного хребта Тибетского автономного района (рис. 1).

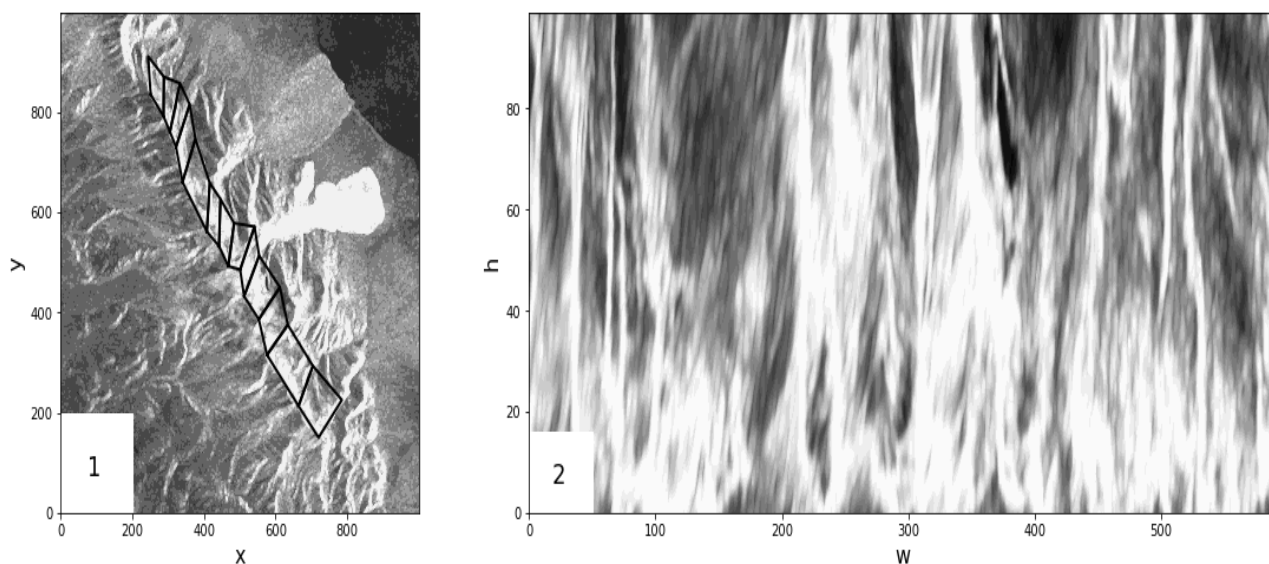


Рис. 1. Пример полигональной линейзации структуры снежного покрова:

1 – разметка сетки полигонов на исследуемом снимке;

2 – структура после линейаризации данных

Исследование структуры лавиноопасной территории позволило определить характерные участки повышенного риска схода снежной массы. Рассмотрим подробнее последовательность действий.

Особенности исследования структуры лавиноопасной территории

Для качественного исследования структуры хребта на наличие почти периодических зависимостей данные по яркости изображения снежного покрова представляли в виде некоторой матрицы A и подвергали линейаризации, при которой строки и столбцы соответствуют продольным и поперечным направлениям формирования исследуемой горной системы.

Необходимо отметить, что при таком представлении ритмичные такты продольных и поперечных сечений определяют характерные интервалы эквипотенциальных лавиноопасных зон. Линейаризованный вид данных получали с применением полигонального преобразования на основе последовательной сетки четырехугольных полигонов и заданных частот продольной и поперечной дискретизации.

При этом узлы дискретизации, полученные на пересечениях линейаризующих срезов, формировали матрицу значений яркостей пикселей изображения, строки и столбцы которой соответствуют продольным и поперечным сечениям линейаризованной системы вида (1):

$$P_{i,j,r}, i \in [1, \dim(K)], j \in [1..2], r \in [1, \dim(A)], \quad (1)$$

где i – номер полигона; $\dim(K)$ – количество полигонов; j – указатель на сторону полигона (левая/правая); r – номер координаты пространства матрицы A (в рассматриваемом случае принимает значения от 1 до 2).

Многие процессы в своём развитии предполагают участие колебательных подпроцессов, характеризующихся ритмичными характеристиками – одной из основных является период колебаний. Обладание информацией о величине периода позволяет проводить качественное исследование явления в профилях прогнозирования динамики значений вне обозримого диапазона.

Необходимо отметить, что определение периода функции подразумевает равенство значений функции на равномерных интервалах, однако ввиду существования трендовых составляющих и шумов в данных вводится понятие почти периода – учитывающего возможный разброс значений. Для определения величин почти периодов может применяться Фурье-анализ, автокорреляция, но в данном исследовании рассматривается применение метода, основанного на обобщённой сдвиговой функции. Проведение почти периодического анализа предполагает обработку значений функции с упорядоченным аргументом, которыми в данном случае выступают значения внутри единых строк или столбцов матрицы линейаризованных исходных данных.

Таким образом, аргументом функции становится номер элемента в строке или в столбце, а значением функции – соответствующее значение элемента в строке по номеру столбца или в столбце по номеру строки соответственно.

Почти периодический анализ с применением обобщённой сдвиговой функции подразумевает нахождение величин интервалов единообразного поведения функции, называемых почти периодами, на основе положений каналов локальных минимумов обобщённой сдвиговой функции (2), выражаемой для набора значений анализируемой функции, обладающей равномерным упорядоченным аргументом:

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

где N – общее число отсчётов функции $f(t)$; t – упорядоченный аргумент дискретной функции $f(t)$; f_t – значение функции $f(t)$ в значении аргумента t ; Δt – значение сдвига по аргументу; τ – значения почти периодов.

Исследование интервалов единообразия производили в отношении строк и столбцов матрицы линеаризованных данных. Пример выполненного сечения линеаризованных данных по вертикальному аргументу $h=50$ приведен на рис. 2.

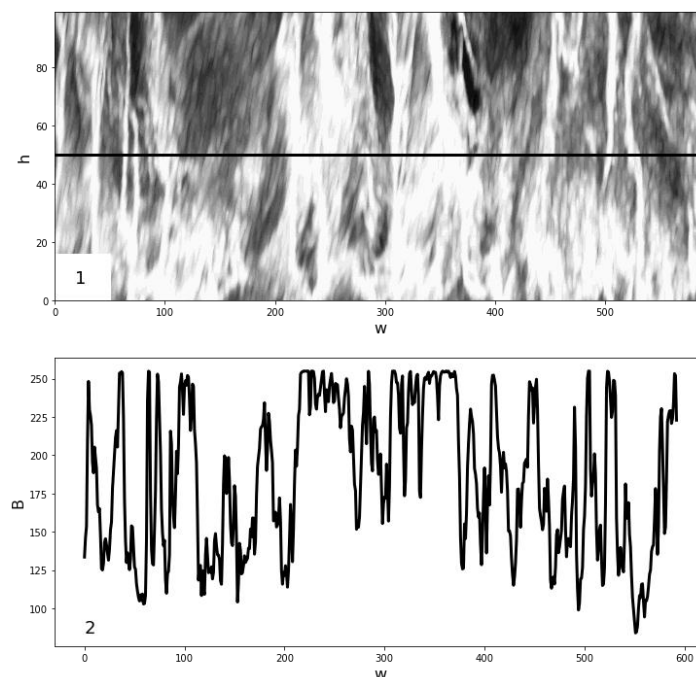


Рис. 2. Пример продольного сечения линеаризованных данных:
(1) – положение сечения в структуре линеаризованных данных;
(2) – график сечения

В исследуемом наборе данных выявлены почти периодические характеристики – данные представлены последовательностью практически равномерно разделённых колебаний, воспроизводящих положения каналов схода снежных масс.

Применение выражения (2) к данным рис. 2 (2) позволило создать поверхность, сечение которой приведено на рис. 3.

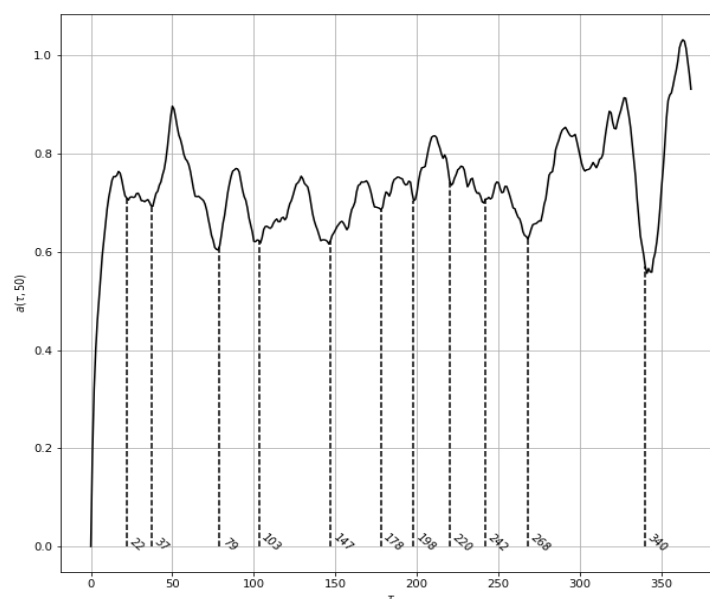


Рис. 3. Срез обобщённой сдвиговой функции для данных рис. 2 (2)
с разметкой локальных минимумов

Установлено, что структура исследуемых данных обладает выраженными почти периодами, во множестве которых присутствует подмножество, реализующее арифметическую прогрессию с шагом, близким к 22 – его формируют локальные минимумы в значениях аргумента 178, 198, 220, 242 и 268 узлах дискретизации.

Также установлено, что отдельную кратную композицию образуют почти периоды в 37, 79, 147, 220 узлов дискретизации.

Таким образом, следует отметить существенность почти периода в 220 узлов дискретизации. Такой почти период реализует ровно два полных такта в структуре хребта и может определять глобальное разделение системы, но не показывать подробную сегментацию. Таким образом, фундаментальными почти периодами, участвующими основы для арифметических прогрессий, являются интервалы в 22 и 37 узлов дискретизации.

Исследование лавинной опасности горной территории по результатам почти периодического анализа линейризованных данных

Результаты исследования почти периодов для поперечного сечения на основе 300-го среза проведено на рис. 4.

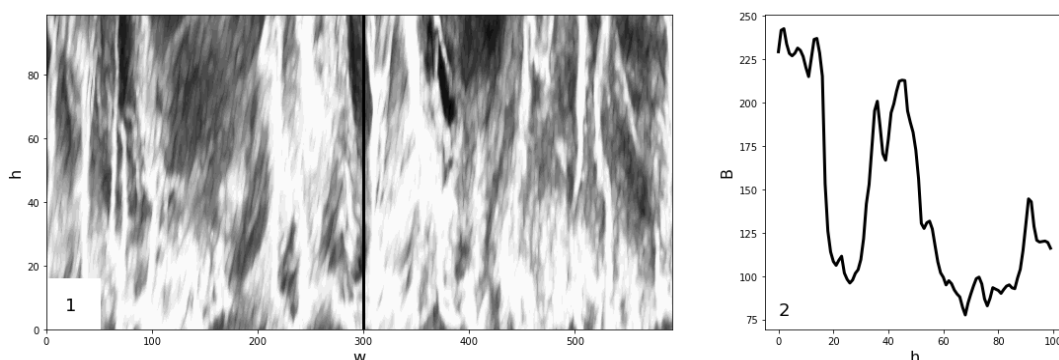


Рис. 4. Пример поперечного сечения линейризованных данных:
(1) – положение сечения в структуре линейризованных данных;
(2) – график сечения

Рис. 4 (2) показывает, что данные обладают колебательным характером с некоторым подобием нисходящего тренда. Колебания яркости пикселей указывают на последовательные полосы снежных масс, обладающими разрывами в своей структуре. Применение выражения (2) к данным рис. 4 (2) даёт возможность вычислить значения почти периодов – они расположены в локальных минимумах графика среза обобщённой сдвиговой функции на рис. 5.

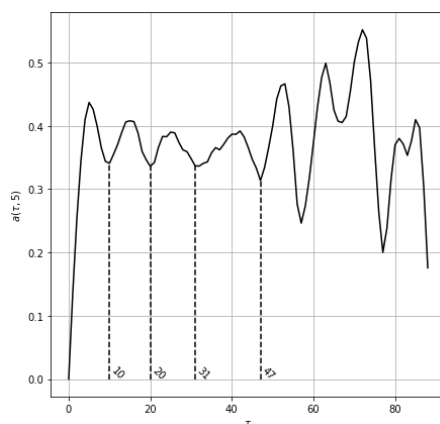


Рис 5. Срез обобщённой сдвиговой функции для данных рис. 4 (2)
с разметкой локальных минимумов

Рис. 5 демонстрирует выраженные и хорошо разрешимые локальные минимумы, что указывает на их существенность в природе исследуемых данных. Также важно отметить равномерный характер почти периодов – так же, как ранее на примере рис. 3, они формируют последовательность, близкую к арифметической. Так, почти период в 10 узлов дискретизации делит исходный набор данных на 10 полос, что в масштабе обзримых данных выглядит избыточно подробно. Для качественной сегментации применим сегментацию по наибольшему выделенному почти периоду, принадлежащему последовательности.

По результатам почти периодического анализа данных выбраны продольный и поперечный почти периоды, образующие сегменты единообразного поведения функции в строках и столбцах матрицы, разделенные равномерно отдалёнными границами, формирующими прямоугольную сетку в пространстве линейризованных данных (рис. 6).

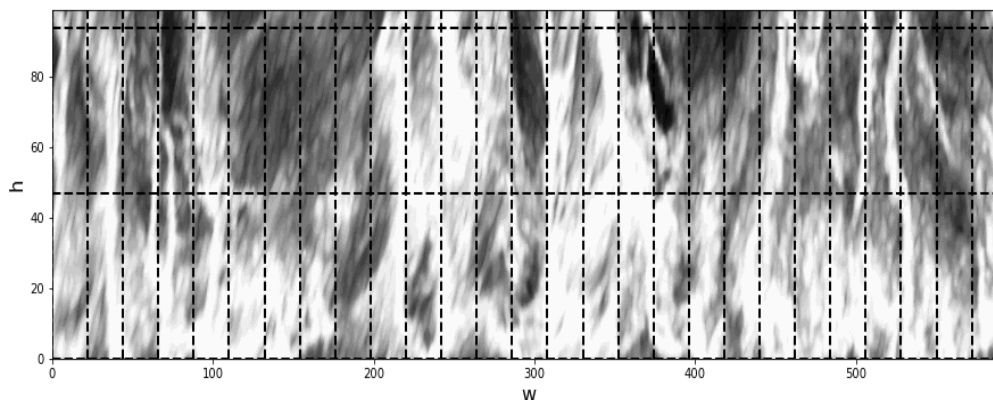


Рис. 6. Пример нанесения разметки лавиноопасных участков по результатам расчётов почти периодов в структуре линейризованных данных снежного покрова

На рис. 6 видно, что поперечный почти период в 47 узлов дискретизации формирует пространственный барьер накопления снежной массы, пересечение которого вызывает сход накопившегося объёма. Продольные почти периоды в 22 узла дискретизации формируют каналы схода снежных масс – можно заметить, что количество задействованных каналов коррелирует с силой последствий – так, сходы снежных масс в рамках комплекса 4 каналов от 188 до 264 узлов дискретизации и сход в 3 каналах в узлах дискретизации 296–370 соответствуют сходам лавин (рис. 7).

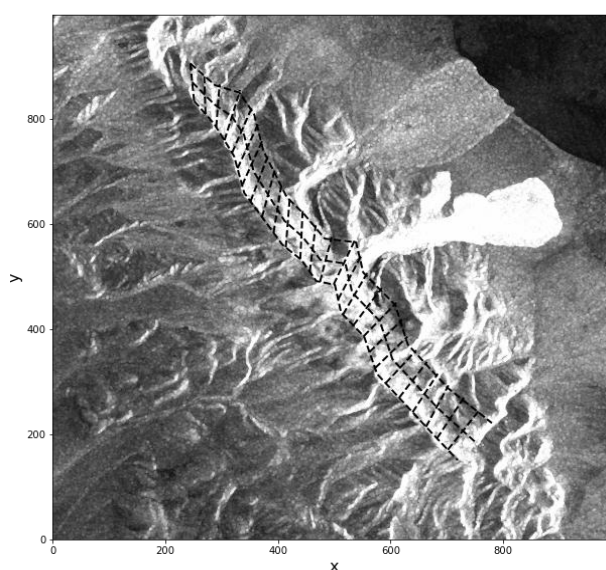


Рис. 7. Пример нанесения разметки лавиноопасных участков по результатам расчётов почти периодов в структуре исходных данных снежного покрова

Заключение

Таким образом, по результатам проведённого исследования спутниковых изображений территорий на основе почти периодического анализа показана принципиальная возможность установления потенциально лавиноопасных участков (зон) исследуемой местности по результатам воспроизведения сетки единообразия на исходных данных.

На основе представленного механизма линеаризации и дальнейшей обработки линеаризованных данных был реализован программный продукт для применения почти периодического анализа с использованием полигонального разбиения для нелинейных структур на изображении с целью для принятия мер по противодействию опасному природному явлению снежным лавинам [11].

Список источников

1. Snow avalanche in the Indian Himalayas: Hazard zonation and climate change trends in Kullu region of Himachal Pradesh, India / J.K. Bansal [et al.] // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2025. Vol. 138. P. 103882. DOI: 10.1016/j.pce.2025.103882
2. Review of spatial variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation / J. Schweizer [et al.] // *Cold Regions Science and Technology*. 2008. Vol. 51. Iss. 2–3. P. 253–272. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.04.009
3. Лавинная активность в России в условиях изменяющегося климата / А.С. Турчанинова [и др.] // *Вестник Российского фонда фундаментальных исследований*. 2022. № 3–4 (115–116). С. 122–131.
4. Ридинский реликтовый национальный парк. Федерация альпинизма и скалолазания. Снег и лавины в горах. Прогноз и безопасность. Гудаута: РПНП, 2024. 36 с.
5. Barbolini M., Keylock C. A new method for avalanche hazard mapping using a combination of statistical and deterministic models // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2002. Vol. 2. P. 239–245. DOI: 10.5194/nhess-2-239-2002
6. Singh A., Ganju A. A supplement to nearest-neighbour method for avalanche forecasting // *Cold Regions Science and Technology*. 2004. Vol. 39. Iss. 2–3. P. 105–113. DOI: 10.1016/j.coldregions.2004.03.005
7. Snow avalanche hazard prediction using machine learning methods / B. Choubin [et al.] // *Journal of Hydrology*. 2019. Vol. 577. P. 123929. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123929
8. Chen M., Mao S., Liu Yu. Big data: survey // *Mobile Netw Appl*. 2014. Vol. 19 (2). P. 171–209.
9. Jaseena K.U., David J.M. Issues, challenges, and solutions: big data mining // *Comput Sci Inf Technol (CS & IT)*. 2014. Vol. 4. P. 131–40.
10. Big data analytics: a survey / C.W. Tsai [et al.] // *J Big Data*. 2015. Vol. 2 (1). P. 21.
11. Программа полигонального разбиения изображений с объектами нелинейной структуры: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688034 / Кузнецова К.А., Калач А.В., Парамонов А.А., Смоленцева Т.Е., Крынецкий Б.А.; зарег. 05.11.2024; опубл. 25.11.2024.

References

1. Snow avalanche in the Indian Himalayas: Hazard zonation and climate change trends in Kullu region of Himachal Pradesh, India / J.K. Bansal [et al.] // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2025. Vol. 138. P. 103882. DOI: 10.1016/j.pce.2025.103882
2. Review of spatial variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation / J. Schweizer [et al.] // *Cold Regions Science and Technology*. 2008. Vol. 51. Iss. 2–3. P. 253–272. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.04.009
3. Lavinnaya aktivnost' v Rossii v usloviyah izmenyayushchegosya klimata / A.S. Turchaninova [i dr.] // *Vestnik Rossijskogo fonda fundamental'nyh issledovaniy*. 2022. № 3–4 (115–116). S. 122–131.

4. Ricinskij reliktovyj nacional'nyj park. Federaciya al'pinizma i skalolazaniya. Sneg i laviny v gorah. Prognoz i bezopasnost'. Gudauta: RRNP, 2024. 36 s.
5. Barbolini M., Keylock C. A new method for avalanche hazard mapping using a combination of statistical and deterministic models // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2002. Vol. 2. P. 239–245. DOI: 10.5194/nhess-2-239-2002
6. Singh A., Ganju A. A supplement to nearest-neighbour method for avalanche forecasting // Cold Regions Science and Technology. 2004. Vol. 39. Iss. 2–3. P. 105–113. DOI: 10.1016/j.coldregions.2004.03.005
7. Snow avalanche hazard prediction using machine learning methods / B. Choubin [et al.] // Journal of Hydrology. 2019. Vol. 577. P. 123929. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123929
8. Chen M., Mao S., Liu Yu. Big data: survey // Mobile Netw Appl. 2014. Vol. 19 (2). P. 171–209.
9. Jaseena K.U., David J.M. Issues, challenges, and solutions: big data mining // Comput Sci Inf Technol (CS & IT). 2014. Vol. 4. P. 131–40.
10. Big data analytics: a survey / C.W. Tsai [et al.] // J Big Data. 2015. Vol. 2 (1). P. 21.
12. Programma poligonal'nogo razbieniya izobrazhenij s ob'ektami nelinejnoj struktury: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2024688034 / Kuznecova K.A., Kalach A.V., Paramonov A.A., Smolenceva T.E., Kryneckij B.A; zareg. 05.11.2024; opubl. 25.11.2024.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 29.08.2025; одобрена после рецензирования: 19.01.2026; принята к публикации: 06.02.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 29.08.2025; approved after review: 19.01.2026; accepted for publication: 06.02.2026

Информация об авторах:

Калач Андрей Владимирович, начальник кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну Воронежского института ФСИН России (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1А); профессор кафедры прикладной математики МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), доктор химических наук, профессор, e-mail: a_kalach@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>, SPIN-код: 2584-7456

Крынецкий Борис Алексеевич, аспирант кафедры прикладной математики МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), e-mail: boriskr1998@mail.ru

Соловьев Александр Семенович, профессор кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну Воронежского института ФСИН России (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1А), доктор технических наук, доцент, e-mail: asoloviev58@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6150-1090>, SPIN-код: 2494-6180

Information about the authors:

Kalach Andrey V., head of the department of information security and protection of information constituting a state secret of the Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia (394072, Voronezh, Irkutskaya str., 1A); professor of the department of applied mathematics of MIREA – Russian technological university (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), doctor of chemical sciences, professor, e-mail: a_kalach@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>, SPIN: 2584-7456

Krynetsky Boris A., postgraduate student of the department of applied mathematics of MIREA – Russian technological university (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), e-mail: boriskr1998@mail.ru

Soloviev Alexander S., professor of the department of information security and protection of information constituting a state secret of the Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia (394072, Voronezh, Irkutskaya str., 1A), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: asoloviev58@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6150-1090>, SPIN: 2494-6180