

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

На правах рукописи



Крынецкий Борис Алексеевич

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА
ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ**

2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор химических наук, профессор
Калач А.В.

Москва – 2026

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Актуальные вопросы анализа и прогнозирования снежных лавин ..	15
1.1 Анализ существующих подходов к исследованию лавинной опасности .	15
1.1.1 Классификация снежных лавин.....	15
1.1.2 Современные методы моделирования снежных лавин.....	20
1.1.3 Почти периодический анализ в задачах исследования быстроразвивающихся опасных природных явлений.....	21
1.1.4 Искусственный интеллект в задачах исследования опасных природных явлений.....	23
1.2 Актуальность исследований лавинной опасности в Российской Федерации.....	25
Выводы по Главе 1	30
Глава 2. Методы и алгоритмы пространственно-временного анализа снежного покрова и лавинной опасности.....	32
2.1 Онтология анализа лавинной опасности	32
2.2 Почти периодический анализ в задачах анализа графических данных о снежном покрове.....	35
2.3 Алгоритмы преобразований визуальных данных о снежном покрове.....	40
2.4 Алгоритмы статистической предобработки данных о снежном покрове .	55
Выводы по Главе 2	72
Глава 3. Критерии и модели оценки лавинной опасности.....	73
3.1 Характеристики почти периодического анализа в решении задач исследования визуальных данных спутниковых снимков снежного покрова.	73

3.2 Почти периодический анализ как инструмент прогнозирования лавинной опасности.	89
3.3 Особенности устойчивости моделирования методом гидродинамики сглаженных частиц.....	96
3.4 Оценка адекватности моделирования динамики снежной лавины с применением почти периодического анализа.....	102
Выводы по Главе 3	106
Глава 4. Программный комплекс поддержки принятия решений для оценки лавинной опасности на основе почти периодического анализа.....	107
4.1 Алгоритмизация принятия решений при оценке лавинной опасности на основе почти периодического анализа.....	107
4.2 Архитектура программного комплекса для оценки лавинной опасности.	110
4.3 Программная реализация оперативного моделирования гидродинамики сглаженных частиц.....	124
Выводы по Главе 4	129
Заключение	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	132
Приложение	162

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Современные вызовы в области анализа больших данных требуют разработки новых и совершенствования существующих высокоэффективных методов обработки сложной, многомерной, слабоструктурированной и неоднородной информации. Одной из областей применения методов интеллектуальной обработки данных является мониторинг и прогнозирование быстроразвивающихся опасных природных явлений. Необходимо отметить, что снежные лавины относятся к наиболее опасным и плохо предсказуемым быстроразвивающимся опасным природным явлениям, сход которых происходит неожиданно, а сам процесс сложно зафиксировать, а мониторинг состояния снежного покрова предполагает анализ сложных пространственно-временных данных в режиме реального масштаба времени [113]. Как известно, этим данным присущи чётко выраженные почти периодические структуры, соответствующие естественным циклам накопления, метаморфозы и деградации снежной массы. Однако применяемое в настоящее время для мониторинга лавинной опасности программно-алгоритмическое обеспечение имеет ряд существенных ограничений, обусловленных неустойчивостью традиционных статистических подходов [42, 111, 112]. В свою очередь, современные методы интеллектуальной обработки информации, в частности алгоритмы глубокого обучения, характеризуются высокой эффективностью при решении задач распознавания образов, но требуют существенные объёмы и высокое качество предварительной обработки исходных данных.

Кроме того, существенным ограничением для практического применения современных методов мониторинга остаётся сложность интерпретации получаемых результатов, что затрудняет установление причинно-следственных связей в проявлении таких быстроразвивающихся опасных природных явлений, как снежные лавины [164]. Таким образом,

возникает противоречие между сложными, но интерпретируемыми физическими моделями и мощными, но эмпирическими алгоритмами машинного обучения. Преодоление этого противоречия требует создания новых гибридных подходов, сочетающих в себе формальную математическую основу и способность к обучению на новых данных.

Перспективным направлением исследований является разработка новых и совершенствование существующих подходов, ориентированных на выявление и анализ скрытых структур в снежном покрове методом почти периодического анализа. Данный подход обеспечит формализацию пространственно-временных закономерностей и идентификацию ритмичных границ, выступающих в качестве предикторов схода лавин, что позволит повысить оперативность мониторинга лавинной опасности путём интеграции методов симметричной трансформации визуальных данных и линеаризации изображений лавиноопасных территорий, алгоритмов пространственно-временного почти периодического анализа структур снежного покрова, критериев и моделей оценки лавинной опасности и информационно-аналитических программных комплексов для поддержки принятия решений в системах предупреждения чрезвычайных ситуаций.

В связи с этим актуальным является повышение оперативности мониторинга лавинной опасности путем совершенствования программно-алгоритмического обеспечения обработки специализированных данных, полученных по результатам мониторинга снежного покрова, включающего результаты дистанционного зондирования, метеонаблюдений и полевых измерений для выявления пространственно-временных закономерностей, непосредственно обуславливающих лавинную опасность, что позволит перейти от ретроспективного анализа к предиктивному управлению за счет оперативного мониторинга таких быстроразвивающихся опасных природных явлений как снежные лавины.

Степень разработанности темы

Исследования в области прогнозирования лавинной опасности ведутся на протяжении нескольких десятилетий в рамках геофизики, гидрометеорологии, системного анализа и геоинформационных технологий. Ведущие научные школы России и зарубежных стран внесли значительный вклад в изучение закономерностей формирования лавинных процессов, их моделирование и картографирование[3, 134, 155].

Фундаментальные исследования динамики снежных лавин выполнены В.М. Котляковым, Л.С. Воробьёвым, С.И. Алексеевым, а также зарубежными специалистами D.M. McClung, J. Schweizer, B. Sovilla, A.V. Herwijnen. В их работах сформулированы физические предпосылки схода лавин, проведены натурные эксперименты и разработаны модели динамики снежных масс. Эти подходы легли в основу инженерных расчётов параметров лавины и оценки опасности на отдельных склонах. Однако применимость таких моделей ограничена недостатком полевых данных и трудностью их адаптации к региональным условиям [74, 75].

Для динамического моделирования лавин применяются специализированные программные продукты RAMMS: AVALANCHE (M. Christen, F. Bartelt), AVAflow (M. Mergili), DAN3D (B. McDougall) и другие, позволяющие оценивать скорость, толщину и давление снежной массы при сходе лавины. Однако, несмотря на высокий уровень физической обоснованности, эти модели требуют точного задания параметров среды и начальных условий, что ограничивает их практическое использование в задачах оперативного прогнозирования[179, 180].

Необходимо отметить, что существенный вклад в развитие информационно-аналитических систем природно-техногенной безопасности внесли исследования А. Х. Аджиева, А.С. Соловьева, В.В. Ничепорчука, М.М. Горохова, А.В. Калача и других исследователей [146-149, 160, 161].

В области статистического и вероятностного анализа лавинных процессов широкое распространение получили методы многомерной

регрессии, байесовских сетей и многокритериальных моделей D. Margreth, K. Kronholm, J. Schweizer, обеспечивающие прогнозирование схода лавины на основе набора метеорологических и топографических факторов. Однако такие методы требуют больших архивов наблюдений и не отражают внутреннюю пространственную структуру снежного покрова, что снижает их прогностическую чувствительность [8, 11, 185].

В последние годы активно развиваются методы дистанционного зондирования и автоматической обработки изображений. Исследования Y. Bühler, T. Hafner, M. Eckerstorfer показали эффективность использования данных спутников Sentinel-1 и Sentinel-2 для картирования лавинных шлейфов. Применяются методы машинного обучения и нейронных сетей S. Barboux, J. Lato, J. Schmid, которые позволяют автоматизировать классификацию лавинных зон и выявление следов сходов. Однако большинство этих методов опирается на статистические признаки яркости и текстуры, не учитывая пространственно-временную изменчивость структуры снежного покрова и не обеспечивая физической интерпретации получаемых результатов. Кроме того, такие методы обладают высокими требованиями к качеству данных, объёмам обучающих выборок, а так же сложностью интерпретации результатов анализа [47, 69, 70, 71, 128, 132, 136].

Работы в области визуализации и трансформации пространственных данных развиваются в смежных дисциплинах – фотограмметрии, медицинской визуализации и компьютерной графике, при геометрической коррекции изображений. Необходимо отметить, что для анализа протяжённых природных структур (потоки, фронты, шлейфы) в настоящее время востребованы адаптивные и осевые трансформации (криволинейная трансформация, сплайн отображение), однако они ограничены областями с известной траекторией и редко применяются к нелинейным природным системам, таким как лавины [130, 136].

Методы почти периодического анализа традиционно используются исследователями для описания квазипериодических процессов (А. Besicovitch, G. Bohr, S. Frisch, В.И. Кузьмин). Известны исследования в геофизике и климатологии рассматривают использование почти периодов для выделения скрытых закономерностей в стохастических сигналах [12, 119].

Значительный вклад в развитие системного анализа и поддержки принятия решений внесли исследования В.В. Подиновского, Д.А. Новикова, Ю.В. Бугаева, И.Г. Малыгина, С.Л. Подвального, И.А. Хаустова и других отечественных исследователей. В их работах сформированы принципы моделирования сложных систем, оптимизации многокритериальных решений и интеграции гетерогенных данных в распределённых вычислительных средах. Эти результаты легли в основу современных геоинформационных и экспертных систем, применяемых в управлении рисками природных и техногенных процессов. Однако применительно к лавинным системам данные разработки не учитывают их динамическую, пространственно-временную и структурную специфику [52, 58, 60, 66, 108, 109, 122-125, 127, 162, 163].

Таким образом, существующие подходы к оценке лавинной опасности, возможно, разделить на следующие три группы – физико-динамические модели, обеспечивающие описание процессов, но требующие большого числа параметров [16, 25, 31]; статистические и вероятностные методы, работающие с архивными наблюдениями, но не отражающие структуру данных [6, 26, 27, 42, 111, 151, 172-177]; методы машинного обучения, дающие высокую точность классификации, но не обеспечивающие интерпретируемость результатов [32, 41, 133, 178].

Проведённый анализ исследований показал, что, несмотря на достигнутые успехи, остаётся нерешённой задача визуализации, трансформации и структурного анализа пространственно-временных данных

в едином системном контуре, обеспечивающем формализацию и прогноз лавинной активности [104, 152, 154]. Недостаточно разработаны методы, позволяющие осуществлять одновременную обработку изображений, восстановление геометрии объектов и выявление скрытых закономерностей снежного покрова в режиме реального масштаба времени.

В связи с этим, актуальным является совершенствование программно-алгоритмического обеспечения системы мониторинга лавинной опасности за счет комбинирования возможностей почти периодического анализа данных и компьютерной визуализации результатов.

Научная задача исследования

Повышение эффективности мониторинга лавинной опасности путем совершенствования алгоритмического инструментария для обработки и анализа слабоструктурированных данных о снежном покрове, учитывающих метеорологические и геоморфологические факторы, влияющие на лавинную активность.

Цель диссертационного исследования

Повышение оперативности мониторинга лавинных процессов за счет интеграции методов визуализации, симметричной трансформации и почти периодического анализа данных о состоянии снежного покрова для формализации и интерпретации структурных признаков и оценки лавинной опасности.

Объект диссертационного исследования

Система мониторинга лавинной опасности.

Предмет диссертационного исследования

Программно-алгоритмическое обеспечение визуализации, обработки и интерпретации пространственно-временных данных мониторинга лавинной опасности.

Задачи диссертационного исследования

1) Проанализировать возможности существующих методов визуализации, трансформации и анализа пространственно-временных данных для решения задач оперативного мониторинга лавинной опасности.

2) Разработать компьютерный метод симметричной трансформации пространственно-временных (визуальных) данных о снежном покрове на основе локальных полигональных аппроксимаций для оценки лавинной опасности методом почти периодического анализа, обеспечивающий топологическую гибкость преобразований и сохранение локальной непрерывности признаков при отображении структур в координатах исходных данных.

3) Сформировать и реализовать в виде программного продукта специальное алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений при оценке лавинной опасности методом почти периодического анализа, обеспечивающее обнаружение и интерпретацию структурных закономерностей в пространственно-временных данных о снежном покрове.

4) Разработать критерии и модель описания и оценки эффективности обработки пространственно-временных данных о лавинной опасности методом почти периодического анализа, обеспечивающие формализацию качественных и количественных характеристик снежного покрова и их связь с вероятностью возникновения лавинных процессов.

Методы исследования

В диссертации применены методы системного анализа, геоинформатики. Для выявления закономерностей использован метод почти периодического анализа, обеспечивающий выделение ритмичных границ и признаков лавинной активности. Динамику снежных масс моделировали методом сглаженных частиц (SPH), а проверку достоверности результатов выполняли с применением статистических и корреляционных методов.

Научная новизна диссертационного исследования

1) Компьютерный метод симметричной трансформации визуальных данных о снежном покрове, отличающийся от существующих подходов использованием локальных полигональных аппроксимаций и обеспечивающий топологически гибкое отображение структур с сохранением локальной непрерывности признаков лавинной опасности в процессе почти периодического анализа.

2) Алгоритм оценки лавинной опасности, отличающийся использованием метода почти периодического анализа линеаризованных данных, полученных в результате полигональной трансформации спутниковых или фотоизображений снежной массы, обеспечивающий получение обоснованных и интерпретируемых значений критериев лавинной опасности.

3) Критерии и модель оценки эффективности обработки данных о лавинной опасности, отличающиеся интеграцией авторских методов трансформации и анализа с сегментацией изображений, обеспечивающие формализацию исследуемых визуальных характеристик снежного покрова.

Теоретическая значимость работы

Расширены возможности программно-алгоритмического обеспечения системы мониторинга лавинных процессов за счет адаптации методов почти периодического анализа для выявления пространственных ритмических структур в изображениях снежного покрова, релевантных для оценки лавинной опасности.

Сформулированы принципы построения специальных нелинейных трансформаций, обеспечивающих переход от исходных растровых изображений снежного покрова к функционально согласованным координатным представлениям, адекватным для анализа объектов со сложной пространственной структурой.

Практическая значимость работы

Разработанный метод симметричной трансформации визуальных данных обеспечивает геометрическую и структурную согласованность изображений лавиноопасных территорий, что позволяет выполнять автоматизированный анализ снежного покрова в системе координат, соответствующей реальной форме лавинных структур.

Применение алгоритма поддержки принятия решений при оценке лавинной опасности позволяет повысить достоверность прогнозов и оперативность анализа благодаря формализации визуальных признаков и интеграции их в систему количественных оценок риска.

Разработанные критерии, модель и программные модули обеспечивают практическую реализацию предложенных методов, ускоряют обработку изображений и визуализацию результатов анализа, что делает возможным их использование в системах мониторинга природных рисков и поддержки решений при прогнозировании лавинной активности.

Научные положения, выносимые на защиту

1) Компьютерный метод обработки, симметричной трансформации и анализа пространственно-временных данных о снежном покрове на основе локальных полигональных аппроксимаций, позволяющий выявлять лавинную опасность.

2) Алгоритм поддержки принятия решений, позволяющий проводить оценку лавинной опасности на основе метода почти периодического анализа пространственно-временных данных о снежном покрове и его программная реализация.

3) Критерии, модель описания и оценки эффективности поддержки принятия решений на основе метода почти периодического анализа пространственно-временных данных о снежном покрове, позволяющие обеспечивать объективный мониторинг лавинной опасности.

Достоверность результатов

Достоверность основных полученных результатов обеспечивается надежными исходными данными, адекватностью выбранного математического аппарата и корректностью применения указанных методов исследования. Достоверность подтверждается апробацией и внедрением полученных результатов в практику работы производственных и образовательных организаций.

Внедрение результатов работы

Основные положения диссертационного исследования внедрены в практическую деятельность ООО «Айти Класс» и в образовательную деятельность Института информационных технологий РТУ МИРЭА в рамках группы направлений подготовки 09.00.00 Информатика и вычислительная техника.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует пунктам паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика: п.3 Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта, п.4 Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта, п.12 Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.

Апробация результатов исследования

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 4-6 декабря 2023 года, «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», Красноярск, 19 апреля 2024 года, «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики»,

Воронеж, 2-4 декабря 2024 года «Предотвращение. Спасение. Помощь», Химки, 26 февраля 2025 года, «Арктика: перспективы, инновации и развитие регионов», Москва - Санкт-Петербург, 22–25 апреля 2025 года, «Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы», Воронеж, 14-15 мая 2025 года, «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций», Красноярск, 22-24 октября 2025 года.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 19 научных работ (6 статей, 8 материалов научных конференций, 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ), 5 из которых опубликованы в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, в том числе 2 работы опубликованы без соавторов.

Личный вклад автора

Автором созданы критерии и модель оценки эффективности обработки данных, реализованные в виде программных модулей информационно-аналитического комплекса. В работах, опубликованных с соавторами, автором разработан компьютерный метод симметричной трансформации визуальных данных лавиноопасных территорий и алгоритм поддержки принятия решений при оценке лавинной опасности методом почти периодического анализа.

Результаты исследований, включая алгоритмы, модели и программные решения, выполнены автором лично и составляют основу диссертационной работы.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 1 приложения. Диссертация изложена на 161 странице машинописного текста, включает 6 таблиц и 58 рисунков. Список использованных источников составляет 187 наименований.

ГЛАВА 1 . АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СНЕЖНЫХ ЛАВИН

Современные тенденции климатических изменений связаны с всевозрастающим количеством быстроразвивающихся опасных природных явлений (ОПЯ), среди которых на территории Российской Федерации, особого внимания заслуживают снежные лавины.

Снежная лавина представляет собой движение снежных масс и (или) льда вниз по крутым склонам гор, характеризующееся внезапностью возникновения и скоротечностью. Своей разрушительной силой снежные лавины представляют угрозу жизни и здоровья людей, а так же наносят ущерб объектам экономики и окружающей природной среде [17-18, 171].

Научные исследования снежных лавин активно выполняются уже достаточно долгое время, начиная с середины XX-го века. Первичные подходы к исследованиям лавинных процессов опирались на методы наблюдений – сначала визуального, а позже приборного. На основе результатов наблюдений проводилась систематизация и выделение основных классов, обладающих единообразными характеристиками, что позволило определять вероятности спонтанного лавинообразования [9-10, 15, 29, 182, 184, 186].

1.1 Анализ существующих подходов к исследованию лавинной опасности

1.1.1 Классификация снежных лавин

Первые генетические классификации лавин основывались на метеорологических явлениях и процессах, возникающих в снежном покрове – так, были выделены два основных класса лавин – сухие и мокрые [2]. К сухим относятся лавины из свежевывающего снега, и образованные метелевым снегопереносом. К мокрым лавинам относились обусловленные авиационным и радиационным таянием снега, а так же возникающие в результате давления воды.

Позже, в работах Лосева К.С. приведены более подробная генетическая классификация лавин – были выделены четыре класса: лавины, причиной возникновения которых являются метеорологические факторы (снегопад, метель, резкое понижение температуры), лавины, причины которых обусловлены комплекса метеорологических факторов и процессов, происходящих внутри снежной толщи при таянии (весеннее снеготаяние, выпадение дождя), лавины, возникающие по причине процессов, происходящих внутри снежной массы (перекристаллизация снега), и лавины, возникающие из-за случайных явлений (землетрясения, деятельность человека) [30, 105, 106].

Помимо попыток обобщения причин возникновения рассматривалась классификация по характеру схода снежных масс. Так, в работе [159] приведены три основных класса лавин: осовы – сходящие по всей поверхности склона, лотковые лавины – соскальзывающие в ложбинах, и прыгающие лавины – пролетающие часть пути после взаимодействия с препятствиями. Приведённые классы носят независимый характер по отношению к причинам возникновения – автором выделяются как мокрые, так и сухие осовы, лотковые и прыгающие лавины.

Отдельным критерием классификации в работе [40] стала механическая устойчивость снега. Автор выделяет сингенетические лавины – обусловленные увеличением сил, сдвигающих снежные массы вследствие наращивания высоты снежного покрова, эпигенетические лавины – вызванные уменьшением сил, удерживающих снежные массы без наращивания высоты снежного покрова, и полигенетические лавины – обусловленные увеличением сил, сдвигающих снег со склона, при одновременном уменьшении сил, удерживающих снег на склоне. Данная классификация так же была впоследствии уточнена.

Известна морфологическая классификация, позволяющая сравнивать характеристики в ключевых этапах развития лавин – в зоне зарождения,

транзитной зоне и зоне отложения. В зоне зарождения лавины классифицируются по типу начала движения на лавины из точки и лавины от линии (снежные доски), которые делятся на подклассы мягкой и твёрдой доски. В зоне транзита вводится классификация по независимым характеристикам – по типу движения различают пылевые (образованные облаком пыли) и текучие (представленные текущим по поверхности склона движением снежной массы) лавины, а по форме пути различают лавины канализированные (движение снежных масс распределено внутри ложбин) и неканализированные (движение снежных масс происходит по всей поверхности склона). В зоне отложения лавины разделяют на классы по характеру отложений – представлены разделения по содержанию воды в отложениях – мокрые и сухие лавинные отложения; по степени загрязнённости отложений – загрязнений либо нет, либо имеющиеся загрязнения выделяют по содержанию – без четкой характеристики, скальные обломки с остатками почвы, ветки и деревья, и обломки сооружений; по характеру поверхности отложений – мелкокомковые отложения, окатанные комья, угловатые блоки, и крупнокомковатые отложения.

Обобщение подходов классификации лавин приводятся в Таблице 1.1. Таблица показывает, что разные модели классификации могут формировать различные разрешающие критерии в рамках единой парадигмы с учётом авторских взглядов на мощность классификатора. Так же в рамках отдельных моделей предлагаются системные взгляды к описанию характеристик снежных лавин на основе морфологического анализа отдельных этапов развития лавин [49-51].

Таблица 1.1 – Классификация лавин

Тип классификации	Критерий классификации	Классы/подклассы лавин/признаков	Автор исследования
Генетическая	Метеорологические данные и процессы, протекающие в снежном покрове	Сухие лавины	Аккуратов В.Н.
		Мокрые лавины	
		Причина возникновения - метеорологические факторы	Лосев К.С.
		Причины возникновения - комплекс метеорологических факторов и процессов, происходящих внутри при таянии	
		Причина возникновения - процессы, происходящие внутри снежной массы	
	Возникающие из-за случайных явлений		
	Механическая устойчивость снега на склоне	Сингенетические лавины	Дзюба В.В.
		Эпигенетические лавины	
		Полигенетические лавины	
Морфологическая	Характер движения	Осовы	Тушинский Г.К.
		Лотковые лавины	
		Прыгающие лавины	

Продолжение Таблицы 1.1 – Классификация лавин

Морфологическая	Характер формы начала движения		Лавины от точки		Международная ассоциация гидрологических наук
			Лавины от линии (мягкая доска, твёрдая доска)		
	Форма пути		Лавина канализированная		
			Лавины неканализированная		
	Тип движения снежных масс		Пылевые лавины		
			Текущие лавины		
	Характер отложений	Содержание воды	Сухие лавинные отложения		
			Влажные лавинные отложения		
		Загрязнение	Чистая лавина		
			Загрязнённая лавина		
			Присутствуют скальные обломки		
			Присутствуют ветки и деревья		
		Шероховатость	Присутствуют обломки сооружений		
			Мелкокомковатые отложения		
			Обкатанные комья		
			Угловатые обломки		
		Крупнокомковатые отложения			

Из Таблицы 1.1 следует, что модели классификации имеют различные критерии в рамках единого характера и отличаются по глубине классификации, что характеризует лавины как сложный и многогранный объект для анализа и прогнозирования. Таким образом, для моделей прогнозирования лавинной опасности явно определены требования к системному характеру оценок и учёту комплексного характера такого ОПЯ, как снежная лавина [28, 36-37].

1.1.2 Современные методы моделирования снежных лавин

С момента возникновения научных исследований в области лавинных процессов, многообразие наблюдаемых форм и механизмов движения снежных масс обусловило необходимость разработки целого спектра методов их моделирования. Эти методы направлены на определение ключевых динамических параметров лавин и прогнозирование особенностей их перемещения по склону [1, 4, 5, 13, 22-24, 154, 138-140, 143, 158, 170, 181, 183].

В настоящее время одной из наиболее востребованных на практике программ для моделирования снежных лавин является RAMMS (Rapid Mass Movations Simulation), которая была разработана Швейцарским институтом снега и лавин, при участии Швейцарского федерального института леса, снега и ландшафтных исследований [132].

RAMMS — двумерная, современная численная имитационная модель для расчета движения геофизических масс (снежные лавины, оползни, селевые потоки) в условиях трехмерного рельефа. В отличие от одномерных моделей заложенная в программу RAMMS двумерная модель на основе модели Вельми-Зальмана позволяет моделировать образование лавин с разной площадью и высотой обрушающегося пласта снега. Входные параметры модели RAMMS: цифровая модель рельефа (ЦМР), граница зоны зарождения лавины и толщина отрыва снежного пласта в ней; коэффициенты трения/

Другой моделью, применяемой в современных практиках исследования лавинных процессов, является DAN3D (Dynamic Analysis of Landslides 3D) — проприетарное программное обеспечение для трехмерного моделирования быстропротекающих склоновых процессов: оползней, обвалов, селевых потоков и снежных лавин. Модель была разработана канадским исследователем О. Хунгером и его коллегами как эволюция более ранней двумерной модели DAN.

К недостаткам моделей относятся высокие требования к точности задаваемых вручную начальных условий, скрытые проприетарные алгоритмы вычислений, чувствительность к результатам калибровки параметров под условия отдельных регионов моделирования [65, 67].

1.1.3 Почти периодический анализ в решении задач исследования быстроразвивающихся опасных природных явлений

Почти периодический анализ был использован в работе Бурлакова А.В., Кузьмина В.И. и др. [38, 54] Авторы проводили анализ кинетической кривой изменения окислительно-восстановительного потенциала водной среды в процессе развития популяции эмбрионов выюна при фиксированной температуре на протяжении времени до завершения стадии оплодотворения и начала стадий деления клеток. В результате, на всём интервале времени наблюдения были выявлены временные отсечки являющихся маркерами периодизации основных рубежей развития эмбрионов. В продолжение темы анализа данных по живым организмам, было проведено исследование Есиповым И.В. и Кузьминым И.В. по анализу заболеваемости COVID-19 в России. Исследования включали в себя и сравнительную характеристику применяемого метода на основе сдвиговых функций с известными методами – Фурье анализом и автокорреляционной функцией. Методы дали схожие результаты, однако, на больших интервалах исследования, методы Фурье и автокорреляции показали результаты хуже, чем сдвиговая функция. Данный факт сравнительной характеристики был подтверждён в ходе работы с

большим объёмом данных по солнечной активности. Методы Фурье и автокорреляции не показали известных вековых циклов.

Основная задача данного метода – определение структурных периодических компонентов исследуемой системы. Ярким примером решения такой задачи служит работа Гадзаова А.Ф., Тытика Д.Л. В работе проводилось исследование кинетики изменения интенсивности оптического поглощения света обратноцеллярной системы (ОМС). В ходе работы к полученным экспериментальным данным был применён метод почти периодического анализа на основе сдвиговой функции, в результате были определены отсечки времени релаксации (почти периоды) в ОМС, которые можно использовать для оценки параметров управления кинетикой на определенных стадиях химического синтеза наночастиц металлов.

Для применения почти периодического подхода для анализа больших объёмов данных была проведена оценка сложности алгоритма, в результате чего была построена расчётная программа для анализа больших данных с упорядоченным аргументом [116, 120].

Как можно заметить, представленный подход анализа данных определяет структурные периодические компоненты системы в большинстве исследовательских сфер, где мы можем получить в качестве входных значений – данные с упорядоченным аргументом. При этом многие системы после получения естественных структурных зависимостей критических уровней позволяют построить прогнозные оценки. Возможности прогнозирования критических рубежей, на основе выявленных зависимостей проиллюстрировано в ряде работ [78, 117, 118].

Почти периодический анализ макроэкономических показателей России был представлен в работе Парамоновым А.А. и Кузьминым В.И.. В ходе работы были выявлены основные периодические компоненты процесса, которые оказались, связаны с солнечной активностью и циклами

Кондратьева. На основе полученных результатов были сделаны среднесрочные прогнозные оценки кризисов.

Выявление почти периодических компонент с возможностью дальнейшего прогнозирования развития системы возможно и на погодных данных. Так, на текущий момент, проводятся исследования в области анализа большого массива данных по атмосферному давлению с возможностью дальнейшего прогнозирования пиковых значений давления.

1.1.4 Искусственный интеллект в задачах исследования опасных природных явлений

В последнее десятилетие методы искусственного интеллекта (ИИ), и в частности глубокого обучения, стали активно применяться для автоматизации анализа данных в геонауках и исследованиях опасных природных явлений. Основными направлениями являются семантическая сегментация спутниковых и аэрофотоснимков для картирования последствий явлений, детектирование объектов (например, оползней, лавинных шлейфов), а также прогнозное моделирование на основе временных рядов мультиспектральных и метеорологических данных.

В контексте лавинных исследований нейронные сети демонстрируют значительный потенциал для решения задач автоматического дешифрирования. Так, свёрточные нейронные сети (CNN) применяются для семантической сегментации с целью выделения лавинных шлейфов на изображениях Sentinel-2 и Sentinel-1. Архитектуры типа U-Net показывают высокую точность при наличии большого объёма размеченных данных, автоматизируя трудоёмкий процесс картографирования последствий схода лавин. Другим направлением является использование алгоритмов детектирования объектов (YOLO, Faster R-CNN) для поиска и классификации лавин на обширных территориях. Кроме того, рекуррентные нейронные сети (RNN) и их модификации (LSTM) исследуются для прогнозирования

лавинной опасности на основе многолетних рядов метеоданных, выявляя сложные нелинейные зависимости между факторами.

Однако, несмотря на высокие показатели точности в задачах классификации и детектирования, широкое внедрение методов глубокого обучения в системы оперативного мониторинга лавинной опасности сталкивается с рядом фундаментальных ограничений:

1. Зависимость от объёмов и качества размеченных данных. Эффективное обучение современных нейронных сетей требует тысяч, а часто десятков тысяч размеченных примеров. Ввиду редкости, скоротечности и сложной структуры задача создания репрезентативных и сбалансированных выборок становится критически ресурсоёмкой для лавин, особенно в конкретном регионе. Это приводит к проблемам переобучения и низкой обобщающей способности моделей при переносе на новые районы с иными физико-географическими условиями.

Сложность интерпретации результатов («проблема чёрного ящика»). Большинство моделей глубокого обучения действуют как эмпирические преобразователи данных, не предоставляя понятного человеку объяснения, почему был сделан тот или иной прогноз или выделена определённая область.

Высокая вычислительная сложность и требовательность к инфраструктуре. Обучение и инференс сложных нейросетевых архитектур, особенно при обработке изображений сверхвысокого разрешения или временных рядов, требуют значительных вычислительных ресурсов (GPU), что может ограничивать возможность их развёртывания в условиях удалённых метеостанций или для анализа в режиме, близком к реальному времени.

Неспособность к анализу скрытых структурных инвариантов. Современные подходы, основанные на ИИ, ориентированы преимущественно на распознавание визуальных паттернов, связанных с

последствиями явления (шлейф, зона отложения). Они слабо приспособлены для выявления и анализа слабовыраженных, предиктивных пространственно-временных закономерностей в структуре самого снежного покрова, которые предшествуют сходу лавины и могут быть описаны в рамках формальных математических моделей (например, как почти периодические последовательности).

Именно эти ограничения – эмпиричность, слабая интерпретируемость, зависимость от больших данных и неориентированность на выявление формализуемых структурных инвариантов – обуславливают актуальность поиска альтернативных или гибридных подходов. В условиях дефицита размеченных данных и необходимости обеспечения прозрачности прогноза методы, основанные на чётком математическом аппарате (такие как почти периодический анализ), обладают значительным потенциалом. Они позволяют выявлять объективные, воспроизводимые и интерпретируемые пространственные ритмы в данных, что может служить как самостоятельным инструментом оценки риска, так и ценным источником дополнительных признаков для обучения более эффективных и объяснимых гибридных моделей ИИ в будущем.

1.2 Актуальность исследований лавинной опасности в Российской Федерации

Сложность прогнозирования и разрушительная мощь лавин сохраняют их статус источника регулярных чрезвычайных ситуаций. Результатом таких ЧС становятся многочисленные жертвы и масштабные материальные потери. Законодательно чрезвычайная ситуация трактуется как обстановка, возникшая из-за катастрофы, аварии или стихийного бедствия, которая привела (или может привести) к ущербу для жизни и здоровья людей, окружающей среды, а также к нарушению нормальных условий жизнедеятельности [39, 46].

Чрезвычайные ситуации принято классифицировать по сфере возникновения, характеру протекания, масштабу и степени нанесенного ущерба, а также по ведомственной принадлежности. По сфере возникновения чрезвычайные ситуации классифицируются как природные, техногенные, экологические, биолого-социальные и социальные, военные и космические (Рисунок 1.1).

Природные чрезвычайные ситуации возникают, как правило, в результате катастроф, стихийных бедствий и других природных явлений, вызванных как внешними, так и внутренними причинами воздействия различных сил природы на биосферу.

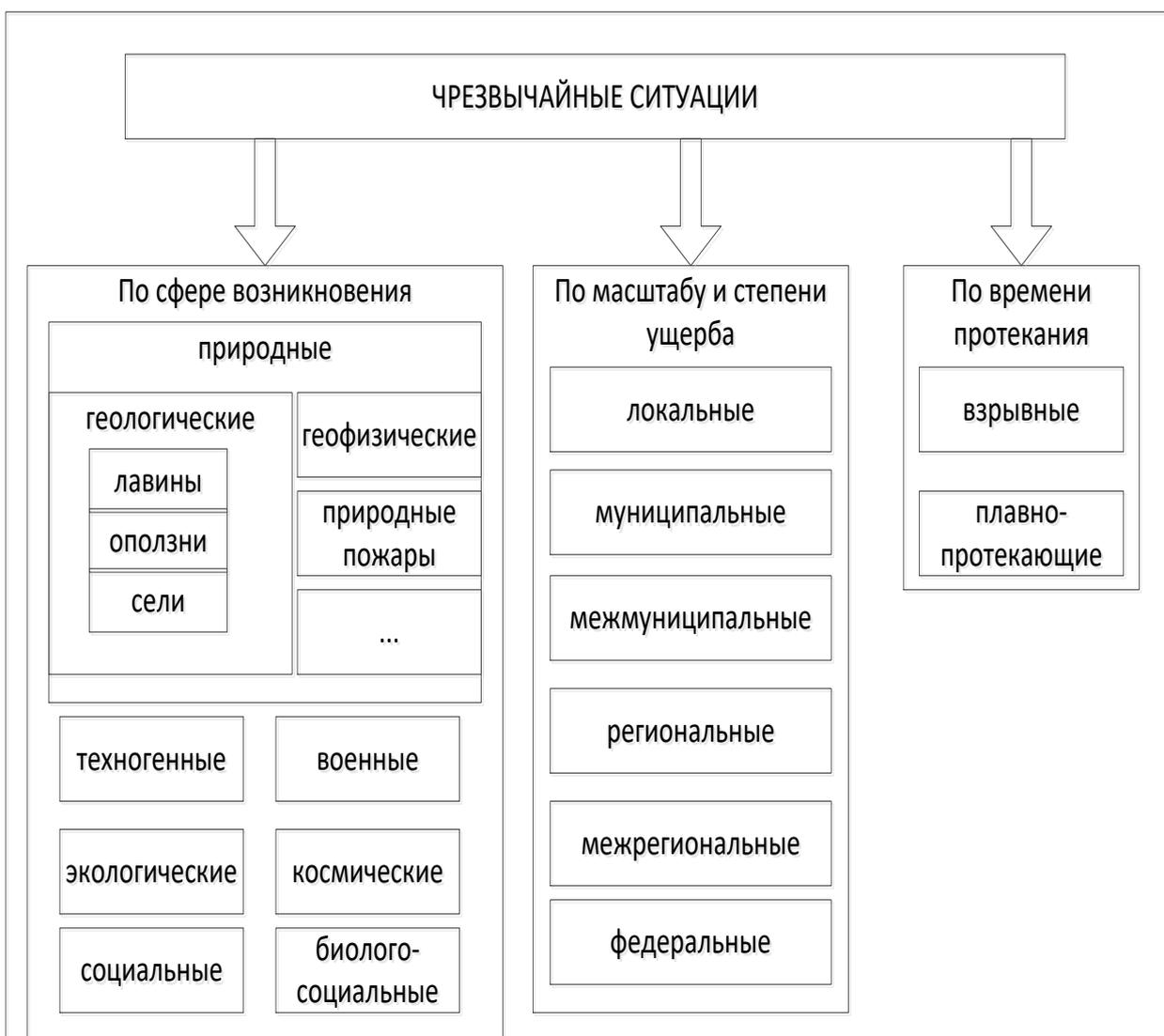


Рисунок 1.1 – Классификация чрезвычайных ситуаций

Наибольший ущерб лавина, как природное явление, наносит населённым пунктам, располагающимся в лавиноопасной зоне. Снежная масса обладает большой сокрушительной силой, сметая все на своем пути на большой скорости, в том числе жилые дома, расположенные у подножия гор, различные объекты инфраструктуры, засыпает дороги, а также уносит много человеческих жизней [39, 149].

Предупреждение чрезвычайных ситуаций - это комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей среде и материальных потерь в случае их возникновения.

Целенаправленное проведение превентивных мероприятий невозможно без знания вероятного характера ожидаемых ЧС, возможного ущерба и потерь от них, которые зависят от сочетания таких важнейших факторов, как опасность и риск. Риск, в свою очередь, также зависит от ряда причин: степени устойчивости объектов инфраструктуры в условиях данной ЧС, наличия в регионе потенциально опасных объектов, плотности населения и застройки, а также свойств грунта и других.

По данным региональных противолавинных центров Росгидромета площадь лавиноопасных территорий в Российской Федерации составляет примерно 3100 тыс км², что эквивалентно 18 % от общей площади страны, наряду с этим примерно еще 830 тыс. км² относятся к категории потенциально лавиноопасных.

Наиболее лавиноопасными районами в России являются Дальний Восток, Кольский полуостров, Урал, Северный Кавказ, Восточная и Западная Сибирь (Рисунок 1.2) [14, 19-21, 33, 156].

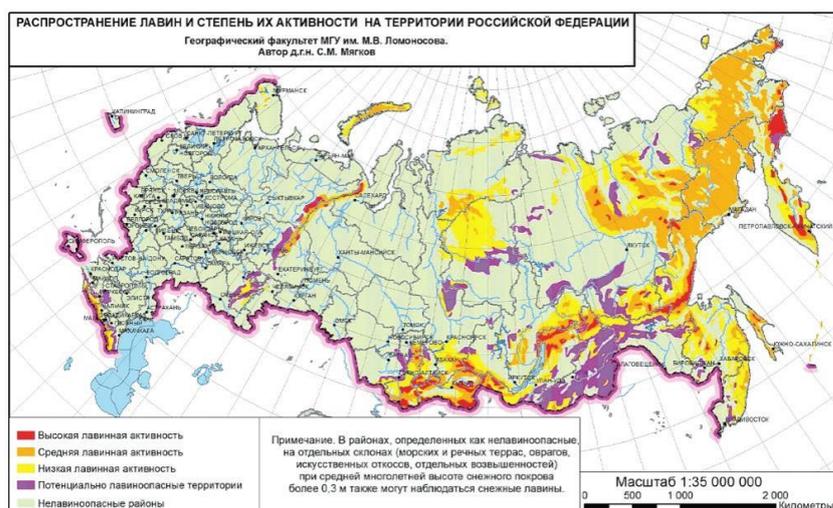


Рисунок 1.2 – Лавиноопасные территории в РФ

Случаи гибели людей в лавинах отмечались почти во всех горных регионах страны, а также и на равнинных территориях. На Рисунке 1.3 приводится статистика наиболее катастрофичных сходов лавин за 2016 – 2021 годы.

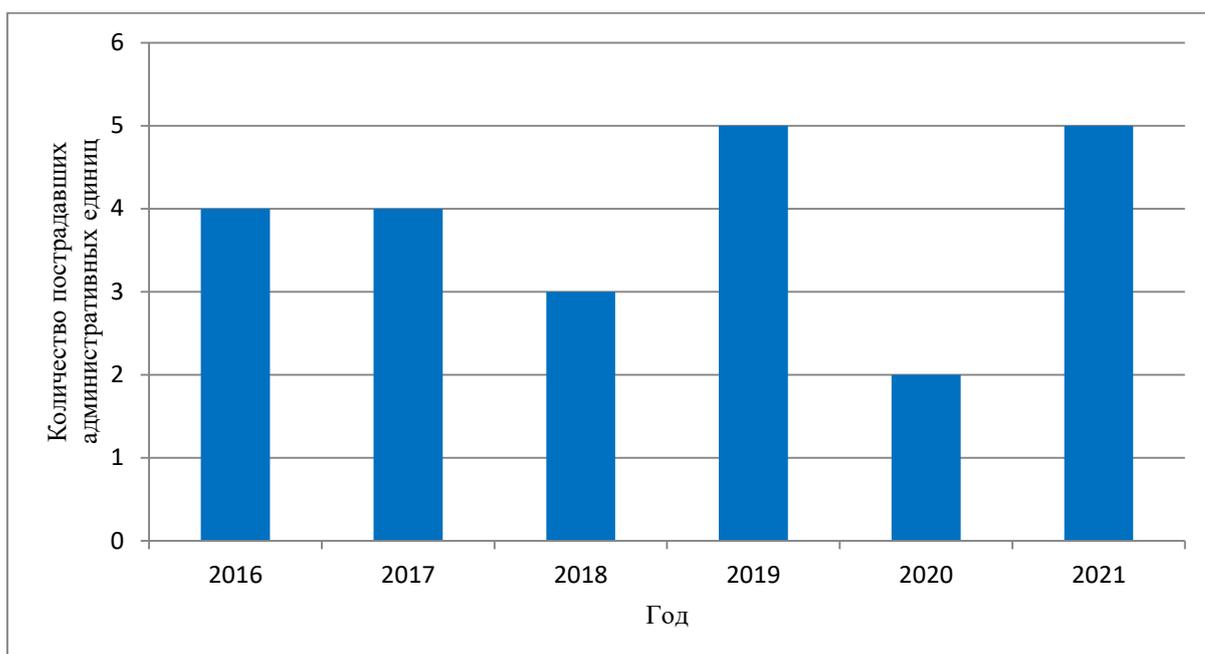


Рисунок 1.3 – Статистика схода снежных лавин на территории РФ

Как видно из рисунка, за последние годы сходы проходят регулярно и многократно, а география этих случаев распространяется на горные районы Карачаево-Черкессии, Приэльбрусья, Чукотки, Алтайского и Хабаровского края, Хибин, Сочи [34, 35, 43, 44-45, 73, 110, 126, 129, 164, 166].

Сходы лавин происходят неожиданно, движущаяся по склону горы снежная лавина встречает на своем пути различные естественные препятствия и объекты инфраструктуры человека. Препятствия воспринимают воздействие лавины, при этом испытывая нагрузки, смещаясь или разрушаясь. Процесс взаимодействия с препятствием является быстротекущим, воздействие снежной массы на препятствие сложно зафиксировать и количественно измерить [59, 72, 103, 141, 150, 167, 187].

Таким образом, своевременная проработка мер по предупреждению чрезвычайных ситуаций любого характера, в том числе и природного, позволяет существенно снизить риски ущерба объектам инфраструктуры, а также спасти человеческие жизни. Определение данных о возможности возникновения ЧС, количественных и качественных характеристик ожидаемого явления, времени его наступления и возможном характере развития — все это относится к мероприятиям по защите населения, объектов инфраструктуры, территорий от возникновения возможных ЧС [104, 114-115, 121, 157].

В Российской Федерации для оценки возможных последствий чрезвычайных ситуаций, оценки состояния работ территориальных органов по предупреждению чрезвычайных ситуаций, а также для разработки мероприятий по снижению риска и смягчению последствий чрезвычайных ситуаций на территории субъектов Российской Федерации разрабатывается паспорт безопасности территории субъектов РФ и муниципального образования.

Таким образом, учитывая характерные особенности ЧС, такие как внезапность возникновения, быстрота развития, неполнота и неопределенность исходной информации, разнообразие и характер последствий, математическое моделирование становится важным инструментом исследования лавинных процессов [61,62].

Выводы по Главе 1

Проведённый в первой главе анализ позволил сформулировать системное представление о проблеме оперативного прогнозирования снежных лавин и выявить ключевые направления для совершенствования методов мониторинга.

Снежные лавины идентифицированы как сложный, многогранный и плохо предсказуемый объект исследования. Существующие классификации (генетические, морфологические) подчёркивают многофакторность процессов лавинообразования, что предъявляет высокие требования к комплексности и системности моделей прогноза. Внезапность и скоротечность схода лавин обуславливают критическую важность оперативности и заблаговременности прогнозных оценок в системах защиты населения и инфраструктуры.

Проведён критический анализ существующего арсенала методов оценки лавинной опасности, который позволил выявить их системные ограничения применительно к задачам оперативного мониторинга:

Физико-динамические модели (RAMMS, DAN3D) обеспечивают детальное описание процесса, но требуют точных входных параметров и значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их использование для быстрого анализа больших территорий.

Методы искусственного интеллекта и глубокого обучения демонстрируют высокую точность в задачах детектирования и сегментации, однако характеризуются «проблемой чёрного ящика», высокой зависимостью от объёмов размеченных данных и слабой способностью к выявлению интерпретируемых физических предикторов, непосредственно характеризующих состояние снежной массы до её схода.

Установлено, что существующие подходы не обеспечивают в полной мере решение задачи выявления и анализа слабовыраженных пространственно-временных паттернов в структуре снежного покрова,

которые могут выступать формализуемыми признаками нарастания лавинной опасности. Возникает научное противоречие между необходимостью оперативных, интерпретируемых прогнозов, основанных на анализе актуальных данных дистанционного зондирования, и отсутствием методов, адекватно сочетающих формальную математическую основу с возможностью работы со слабоструктурированной визуальной информацией в режиме, близком к реальному времени.

В качестве перспективного методологического направления для преодоления выявленных ограничений определены методы, ориентированные на выявление скрытых структурных инвариантов. В частности, почти периодический анализ представляет собой формальный аппарат для выделения ритмичных компонент в данных с упорядоченным аргументом, что подтверждается опытом его успешного применения в смежных областях (геофизика, экономика, биология) для прогнозирования критических рубежей в развитии систем.

Таким образом, анализ подтвердил актуальность и сформулировал основную задачу исследования: разработку программно-алгоритмического обеспечения, интегрирующего методы визуализации и трансформации данных дистанционного зондирования с аппаратом почти периодического анализа. Такой подход направлен на формализацию пространственных признаков лавинной опасности, непосредственно связанных с внутренней структурой снежного покрова, что должно обеспечить переход от ретроспективного описания к оперативной предиктивной оценке. Решению этой задачи посвящены последующие главы диссертации.

ГЛАВА 2 . МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА СНЕЖНОГО ПОКРОВА И ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ

2.1 Онтология анализа лавинной опасности

Эффективное прогнозирование лавинной опасности требует одновременного учёта целой системы гетерогенных факторов – геометрии рельефа, динамики снежных масс, графических и метеорологических данных о снежном покрове. Синтез методов исследования степени лавинной опасности позволяет создать комплексный подход, обеспечивающий комплексные пространственно-временные и обусловленные оценки риска лавинной опасности, направленные на поддержку управленческих решений. Система сущностей, классов и связей объектов в предметной области представлена в виде онтологической модели (Рисунок 2.1)

Таким образом, в рамках модели выделяются 3 основных класса, определяющих процессы исследования разнородных объектов – анализ медиа данных (графических изображений лавиноопасных областей), почти периодический анализ (метод исследования упорядоченных наборов данных), и моделирование движения частиц (модели и методы воспроизведения динамики снежных масс). Так же определен класс, содержащий геоморфологические факторы, влияющие на лавинную опасность – геометрию склона, представленную в его профиле, экспозиции и крутизне.

Класс анализа данных включает в себя процедуры приведения данных к виду, позволяющему проведение почти периодического анализа. Для этого объект «Алгоритм линеаризации данных» преобразует объект «Изображение» с учётом «Аппроксимирующих полигонов» в «Линеаризованные данные».

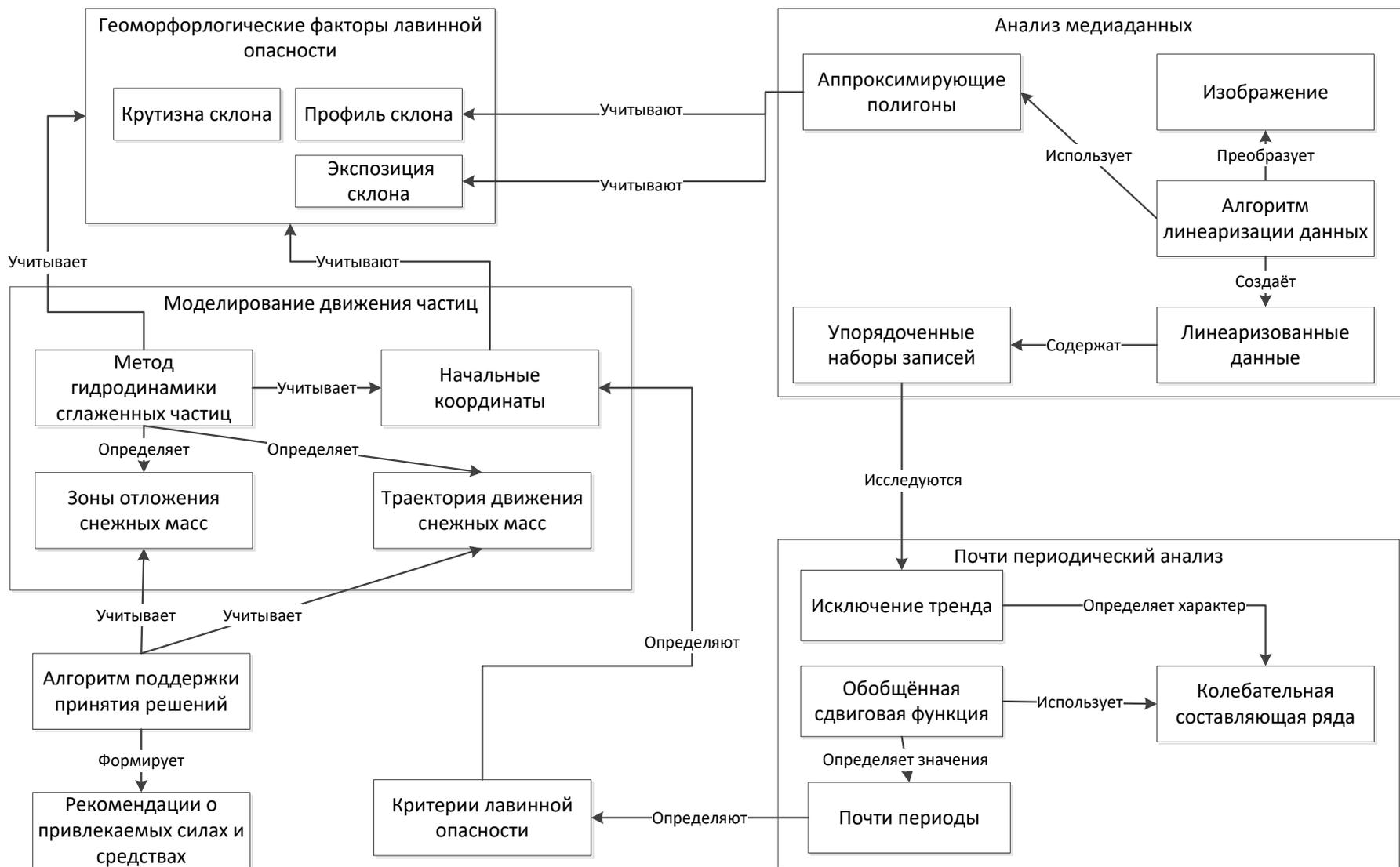


Рисунок 2.1 – Онтологическая модель исследуемой области

«Аппроксимирующие полигоны» определяют топологию области интереса и линеаризации на основе геоморфологических факторов линейной опасности – «Экспозиции» и «Профиля» склона для согласования направлений линеаризации данных и структурного обоснования получаемых оценок.

«Линеаризованные данные» представляют собой структуру, обладающую упорядочиванием по пространственным аргументам, содержащую внутри себя «Упорядоченные наборы записей», которые исследуются с применением почти периодического анализа.

Почти периодический анализ начинается с процедуры «Исключения тренда» из исследуемых «Упорядоченных наборов записей», результат которой определяет характер «Колебательной составляющей ряда». Ядро анализа – «Обобщённая сдвиговая функция» – рассчитывается в отношении «Колебательной составляющей ряда» и позволяет определить значения «Почти периодов». Полученные оценки применяются в качестве «Критериев лавинной опасности», и определяют возможности к определению начальных координат в рамках моделирования движения частиц.

Класс моделирования движения частиц включает сущность «Метод гидродинамики сглаженных частиц». Для реализации моделирования определяются «Начальные координаты», учитывающие представителей класса геоморфологических признаков лавинной опасности и определённые пространственные «Критерии лавинной опасности». Сход лавины, моделируемый в методе, определяет «Зоны отложения» и «Траекторию движения» снежных масс, которые учитываются в «Алгоритме поддержки принятия решений», формирующем «Рекомендации о привлекаемых силах и средствах».

Таким образом, в рамках онтологической модели описаны ключевые классы и сущности, а так же порядок их взаимодействия в рамках исследуемой предметной области.

Приведенная онтология обосновывает принципы взаимодействия разнородных подходов анализа и обработки данных для создания системного подхода к оценке лавинной опасности.

2.2 Почти периодический анализ в задачах анализа графических данных о снежном покрове

В задачах исследования данных, представленных наборами упорядоченных по значению аргумента, существует проблема, связанная с разделением характерных составляющих закономерностей, описывающих закон взаимодействия аргумента и значений функции. Причина обуславливается регулярной априорной неопределённостью истинного характера трендовой составляющей, и характеристик амплитуды и периода колебательной составляющей [76,89, 97, 99-102].

Для разделения трендовой и колебательной составляющих необходимо определение ключевых точек, формирующих поведение тренда. Выделение таких точек позволяет выделить трендовое поведение. Минимальным набором данных, обеспеченным трендовой и колебательной составляющими, является набор из 3 записей вида $y_{t-\Delta t}$, y_t , $y_{t+\Delta t}$, упорядоченных по аргументу t , и расположенных в равноудалённых значениях аргумента с разницей Δt . Решение такой задачи определяется на основе теории пропорций и может быть представлено через арифметическую пропорцию вида (2.1):

$$y_t = \frac{y_{t-\Delta t} + y_{t+\Delta t}}{2} \quad (2.1)$$

где y_t – текущее значение, $y_{t+\Delta t}$ – значение, определённое в значении аргумента, увеличенном на Δt , $y_{t-\Delta t}$ – значение, определённое в значении аргумента, уменьшенном на Δt .

Тогда трендовая характеристика определяется безразмерным критерием (2.2), определяющим состояние трёхточечной системы:

$$\frac{y_{t-\Delta t} + y_{t+\Delta t}}{2 \cdot y_t} = 1. \quad (2.2)$$

Для перехода к шкале, характеризующей новый уровень абстракции, выражение логарифмируется и приобретает вид (2.3):

$$\ln\left(\frac{y_{t-\Delta t} + y_{t+\Delta t}}{2 \cdot y_t}\right) = 0. \quad (2.3)$$

Такой подход применим когда данные характеризуются линейными зависимостями приращений, представляя близкие к арифметическим прогрессии. Однако помимо постоянных приращений, сопровождающих арифметические прогрессии, в данных могут быть представлены и приращения, воспроизводимые в рамках геометрических прогрессий. Тогда соотношение узловых элементов может быть представлено через геометрическую пропорцию вида (2.4):

$$y_t = \sqrt{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}, \quad (2.4)$$

Тогда трендовая характеристика определяется безразмерным критерием (2.5), определяющим состояние системы:

$$\frac{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}{y_t^2} = 1. \quad (2.5)$$

Аналогично (2.3), выражение логарифмируется и приобретает вид (2.6):

$$\ln\left(\frac{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}{y_t^2}\right) = 0. \quad (2.6)$$

Таким образом, применение теории пропорций позволяет выделять трендовые составляющие в данных с различной природой внутренних закономерностей. Результатами исключения тренда по выражению, определённому арифметической прогрессией (2.3), является набор значений, выраженный в виде зависимости (2.7):

$$\ln\left(\frac{y_{t-\Delta t} + y_{t+\Delta t}}{2 \cdot y_t}\right) \sim t. \quad (2.7)$$

Для модели исключения тренда, основанной на геометрической прогрессии (2.6), результаты преобразования данных представляются в виде:

$$\ln\left(\frac{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}{y_t^2}\right) \sim t. \quad (2.8)$$

Для устранения трендовой составляющей в наборе из N эмпирических данных используется выражение (2.7) или (2.8) с параметром Δt , который представляет собой отклонение аргумента. Данный параметр может принимать значения от 1 до $\lfloor N/2 \rfloor$. Путем последовательного вычисления для всех возможных Δt формируется набор из $\lfloor N/2 \rfloor$ колебательных составляющих. Каждая из этих составляющих характеризует исходные данные описывает исходные данные в своём частотном диапазоне.

Таким образом, в разделённых быстрых – колебательных, и медленных – трендовых составляющих достигается независимость, позволяющая исследовать данные без учёта взаимного влияния между характеристиками.

Колебательные закономерности характеризуются парой параметров – амплитудой и периодом (или частотой) колебаний. В извлеченных колебательных составляющих анализируемого набора y_t амплитуда носит характер абстрактной величины, не обладающей размерностью, а периодическая характеристика определена в известном пространстве – соразмерном с аргументом t .

По определению периодом функции $f(t)$ является такое значение τ , для которого выполняется выражение (2.9):

$$f(t+\tau) - f(t) = 0. \quad (2.9)$$

В реальных данных аппроксимируемых периодическими колебаниями, условие (2.9) может не выполняться ввиду влияния шумов. Тогда ставится задача на определение значений аргумента, близких к периодам – их называют почти периоды. Почти период τ функции $f(t)$ определяется с учётом смещения ε :

$$|f(t+\tau) - f(t)| < \varepsilon.$$

В случае дискретного характера функции $f(t)$ для оценки величины почти периода вводится сдвиговая функция вида (2.10).

$$a(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \cdot \sum_{t=1}^{N-\tau} |f(t+\tau) - f(t)|, \quad (2.10)$$

где N — общее число отсчётов функции $f(t)$, t — аргумент функции, определённый на множестве натуральных чисел; τ — почти период функции.

Сдвиговая функция носит характеристику приведённой интегральной оценки набора данных в отношении предполагаемого почти периода. Применение (2.10) по отношению к наборам данных позволяет оценить значение почти периода. Так, для определения почти периодов функции $f(t)$ выполняется перебор значений τ от 1 до $N-1$ для функции (2.10), и выявляются значения, соответствующие локальные минимумы.

Так, в рамках исследуемого ряда для сдвиговой функции (2.10) выступает набор данных выделенных быстрых колебаний. Для исходного временного ряда размерности N и величиной сдвига Δt разделение на быстрые колебания и трендовое движение выполняется от Δ -го элемента до элемента $N - \Delta t$ соответственно. Таким образом получается ряд из $N - 2\Delta t$ элементов.

В рамках системного подхода применение функции (2.10) реализуется в отношении выявляемых колебательных составляющих, полученных в результате процедур извлечения тренда (2.7) или (2.8). Тогда почти периоды определяются в каналах локальных минимумов обобщённой сдвиговой функции (ОСФ), образованной заменой функции $f(t)$ в (2.10) на выражение (2.7) в случае арифметического исключения тренда, либо на выражение (2.8) — в случае геометрического исключения тренда. Во втором случае ОСФ носит вид:

$$a(\tau, \Delta t) = \frac{1}{N-\tau-2\Delta t} \cdot \sum_{t=1}^{N-\tau-2\Delta t} \left| \ln \left(\frac{y_{t-\Delta t+\tau} \cdot y_{t+\Delta t+\tau}}{y_{t+\tau}^2} \right) - \ln \left(\frac{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}{y_t^2} \right) \right|, \quad (2.11)$$

где y_t — значение исследуемой функции y в аргументе t ; N — общее число отсчётов функции y ; Δt — значение сдвига по аргументу, обуславливающие исключение тренда; τ — значение почти периода.

На Рисунке 2.2 представлена схема алгоритма расчёта значений функции (2.11).

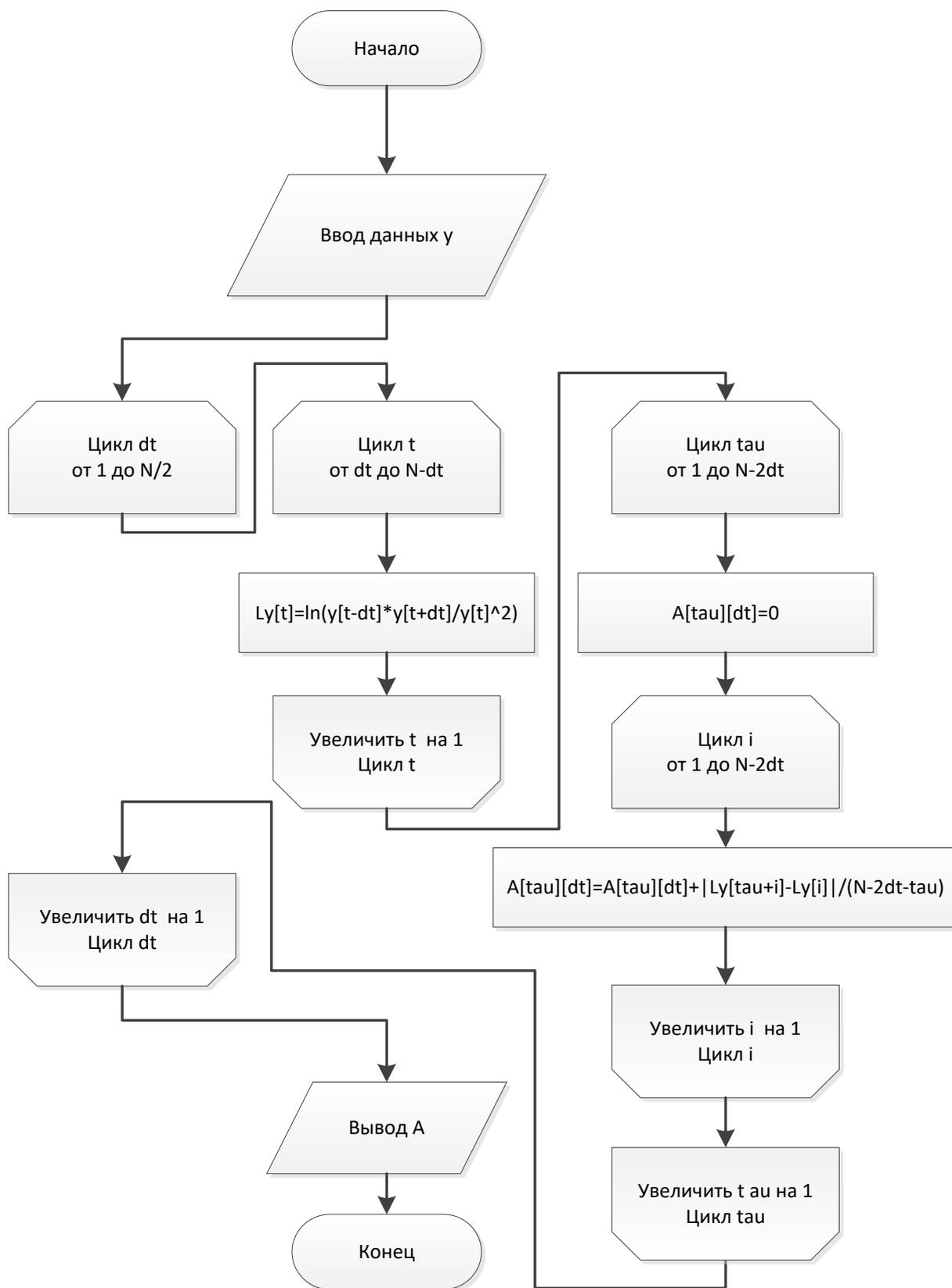


Рисунок 2.2 – Схема алгоритма расчёта значений ОСФ (2.11)

2.3 Алгоритмы преобразований визуальных данных о снежном покрове

При анализе изображений методом почти периодического анализа изображение закономерно представляется в виде матрицы, определяемой строками и столбцами координатной системы [79, 80, 90]. В исследованиях пространственно-временной структуры тропических циклонов данное представление реализуется с использованием как декартовой, так и полярной систем координат [53, 55]. Полученные результаты позволяют выявить фундаментальные структурные паттерны, лежащие в основе экстремальных проявлений циклонов.

В случае анализа циклонов применение инструментария трансформации данных в полярной системе координат обуславливают априорные знания о природе и механизмах развития. В случае исследования лавинной активности такой подход не применим ввиду фундаментальных принципов, лежащих в основе развития такого быстроразвивающегося ОПЯ, как снежная лавина [48].

Для применения почти периодического анализа в отношении данных аэрофотоснимков лавиноопасных территорий необходимо представление данных в виде одномерных наборов значений функции, обладающих упорядоченным аргументом. Такими наборами могут выступать строки и столбцы в матричном представлении изображения, представленного в чёрно-белой гамме. Тогда исследуемой функцией, становится значение яркости чёрно-белого пикселя, определённое в шкале от 0 до 255 условных единиц.

Однако использование строк или столбцов изображения может быть неадекватным решением ввиду априорной несогласованности структуры изображения с геометрией лавиноопасных территорий. Таким образом возникает необходимость в преобразовании данных, основанном на системе координат, способной аппроксимировать произвольную геометрию, согласованную со структурами лавиноопасных территорий [82, 83, 95].

Для согласования системы координат с анализируемой областью предлагается четырёхугольная полигональная аппроксимация, выражающая одной парой сторон полигонов структуры направления предполагаемого направления схода лавин, а другой – границы анализируемого канала аппроксимации. Сложные геометрии склонов аппроксимируются последовательностью сопряженных полигонов, для которых одна из границ первого полигона является границей для второго.

Тогда для описания такой структуры – цепочки сопряженных четырёхугольных N полигонов достаточно описать последовательность $N+1$ пар вершин, определяющих начальную, конечную и множество сопряжённых границ полигонов – пример приведен на Рисунке 2.3.

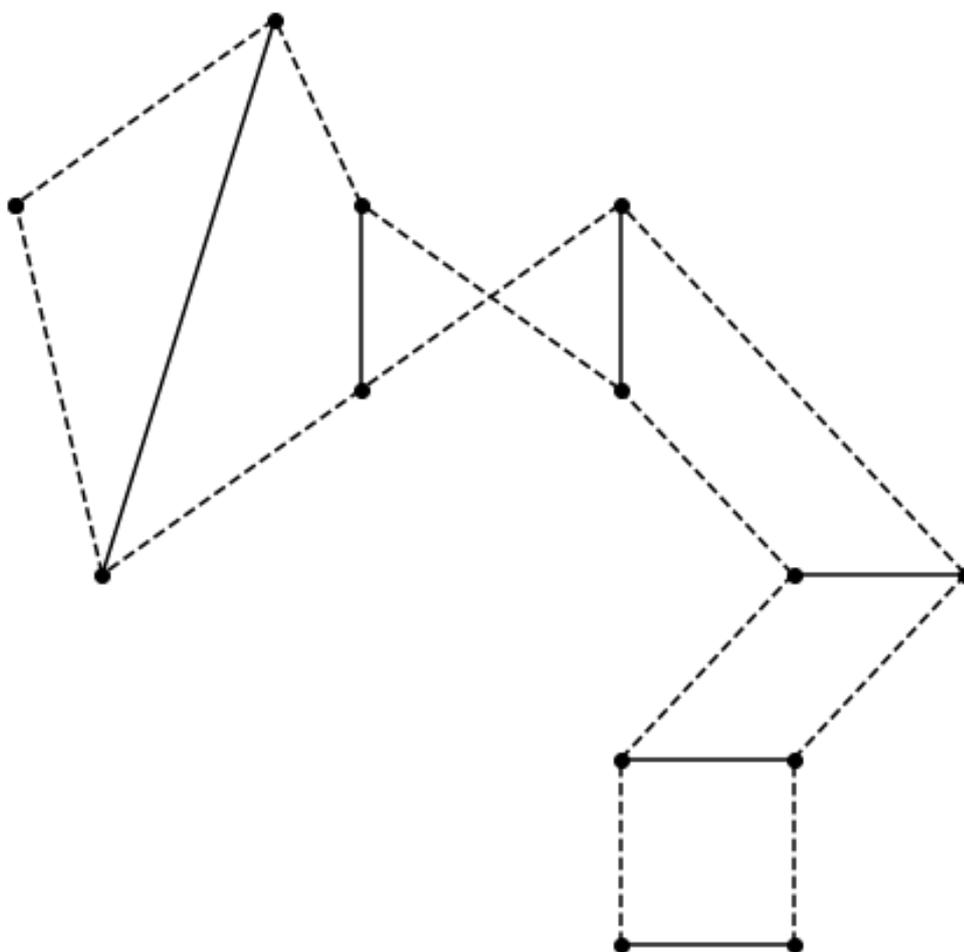


Рисунок 2.3 – Пример последовательности полигонов, построенной на парах вершин

Рисунок 2.3 представляет принцип построения последовательности сопряженных четырехугольных полигонов, заданной последовательностью пар вершин, представленных чёрными маркерами, и соединённых между собой сплошными чёрными отрезками. Соединение соответствующих вершин в парах черными пунктирными отрезками определяет конечную форму аппроксимирующего полигона. На Рисунке представлены все возможные осмысленные представления полигонов, представимых через четыре вершины – последовательно соединены формы квадрата (стороны, параллельны и перпендикулярны); параллелограмма (стороны попарно параллельны); трапеции (параллельны только одна пара сторон); полигона, инвертирующего пространство (ориентация вершин в парах сменяется, пунктирные стороны пересекаются); полигона произвольного характера длины и взаимной параллельности, а так же полигона, у которого вершины в рамках одной стороны точно совпадают, сводя четырехугольный полигон к треугольнику.

После построения последовательности полигонов в структуре каждого полигона определяется сетка узлов, согласованная с геометрией полигонов. Это согласование достигается построением и соединением равномерно распределенных узлов на противоположных гранях полигона. Число узлов на гранях, формирующих последовательность полигонов, должно быть единым для всей системы для согласования размерностей. Таким образом, для системы полигонов строится система из единой частоты поперечной дискретизации NL – определяющей количество интервалов разбиения определяющих граней, и набора из N частот продольных дискретизаций. Частоты продольных дискретизаций могут быть выбраны произвольно, либо определяться по выражению:

$$Np_i = NP \cdot \frac{l_i}{\sum_{j=1}^N l_j}, \quad (2.12)$$

где NP – общее число продольных делений (интегральная продольная частота дискретизации), l_i – длина отрезка, соединяющего середины образующих полигон отрезков.

Так, пример построения сеток и узлов дискретизаций для системы, представленной на Рисунке 2.3, считая $NL=8$, $NP=47$, представлен ниже. С учётом длин срединных отрезков набор частот продольных дискретизаций, рассчитанных согласно выражению (2.12), определён в порядке : 5, 7, 10, 9, 7, и 9 интервалов дискретизации соответственно.

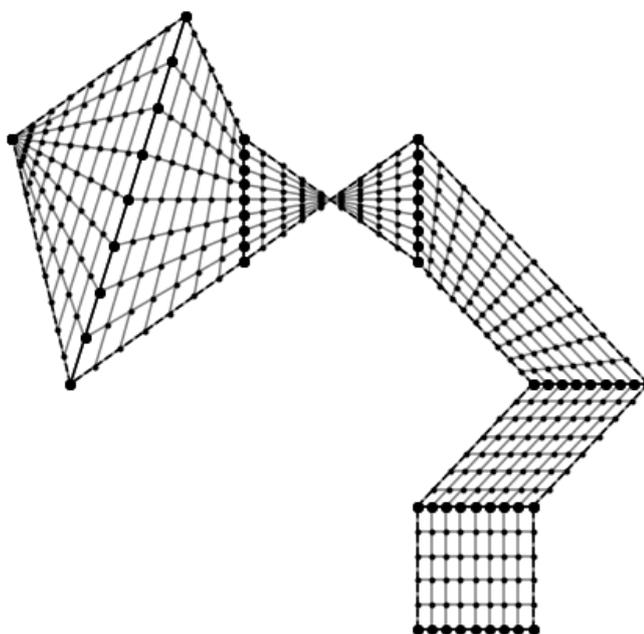


Рисунок 2.4 – Пример разметки узлов дискретизации, обусловленных заданными продольной и поперечной дискретизацией в отношении структуры, представленной на Рисунке 2.3

Таким образом, возникает необходимость в описании алгоритма, позволяющего сопоставить узлу, определённому по индексу в пространстве частот дискретизации, координаты в пространстве аппроксимируемого изображения. Схема алгоритма приведена в графическом виде (Рисунок 2.5).

Алгоритм, определяющий координаты узла в заданной структуре полигонов, разделён на два логических блока: первый – блок определения полигона, которому принадлежит узел, и второй – блок определения координат узла на основе координат вершин полигона [88].

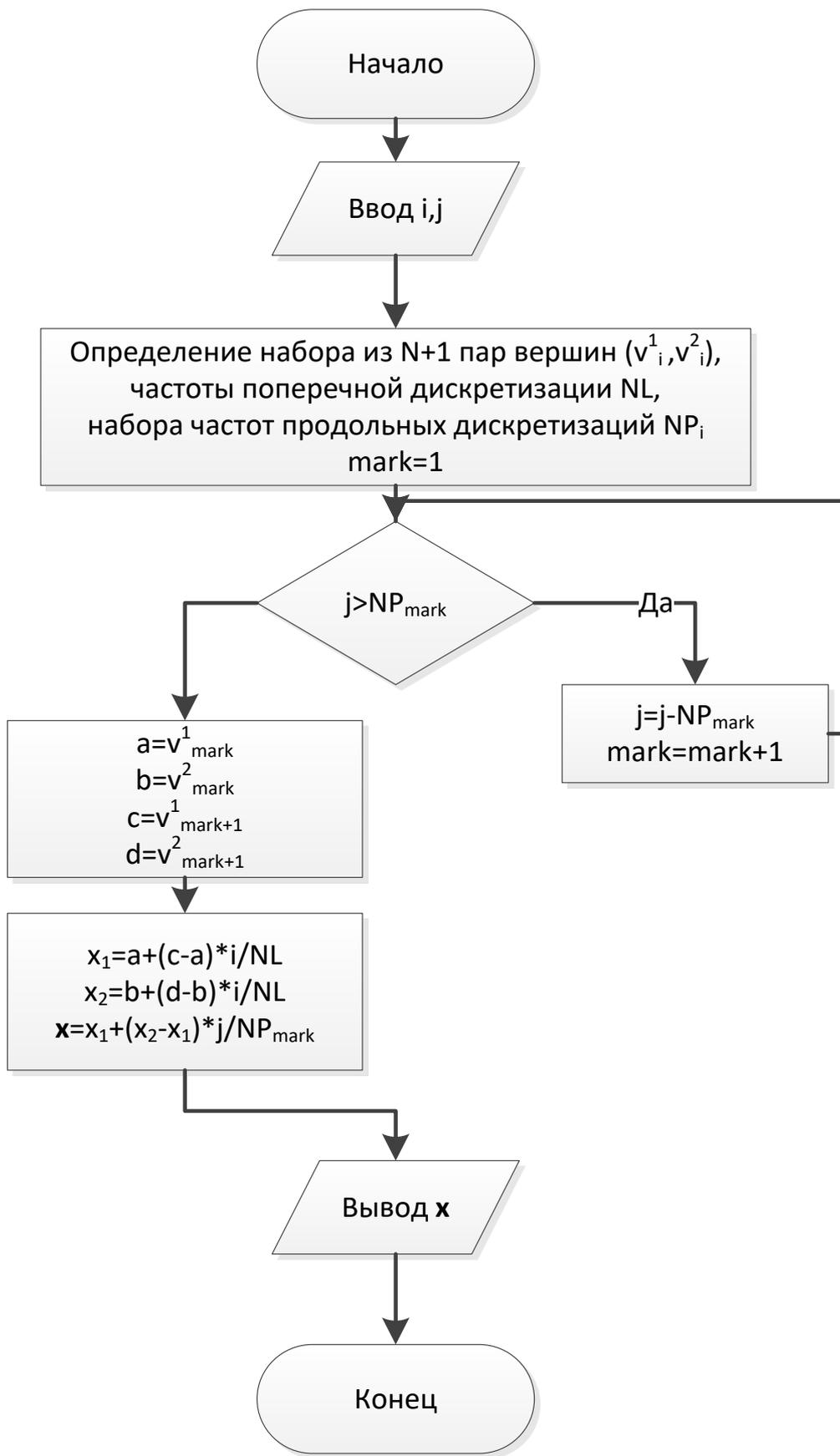


Рисунок 2.5 – Схема алгоритма соответствия индексов узла координатам в пространстве

Первый блок реализован на основе цикла по условию – пока значение индекса j превышает величину продольной частоты дискретизации текущего полигона, значение j уменьшается на величину соответствующей продольной частоты дискретизации, а метка полигона $mark$ прирастает на 1.

Второй блок определяет координаты вершин, задающих полигон. Вершины в рамках алгоритма представляются векторами пар координат (x, y) с условными обозначениями a, b, c, d . На отрезках, соединяющих ac и bd определяются интерполированные координаты узлов x_1 и x_2 соответственно.

Координаты определяются относительным положением на соответствующем отрезке, равным отношению i/NP . Затем между узлами x_1 и x_2 линейно интерполируется положение искомого узла на основе отношения j/NL_{mark} . На выходе алгоритм возвращает x – точку в пространстве аппроксимируемого изображения, представляющую вектор координат (x, y) .

Графическая интерпретация алгоритма, определяющая расстановку узлов a, b, c, d, x_1, x_2 и x в полигоне приводится для предпоследнего полигона рассматриваемой размеченной структуры (Рисунок 2.4).

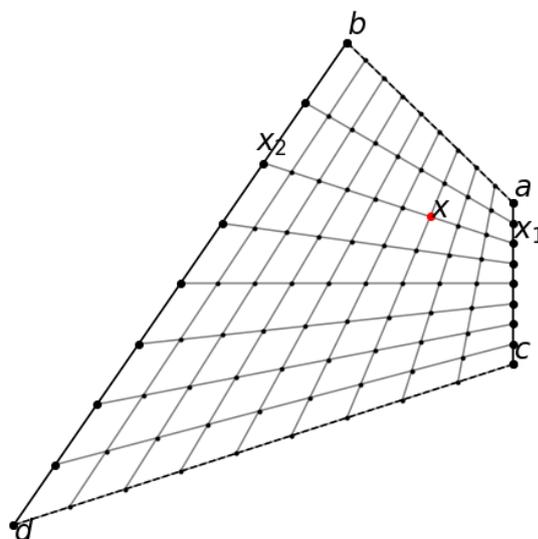


Рисунок 2.6 – Схема взаиморасположения рассчитываемых узлов, используемых в ходе алгоритма

Таким образом, описан алгоритм преобразования элементов аппроксимирующей сетки, определяемой полигональным представлением. Из выражений, применяемых в ходе интерполяции, очевидно, что координаты узлов могут принадлежать пространству рациональных чисел, тогда как исследуемые изображения определены множеством записей в пространстве аргумента, принадлежащего множеству натуральных чисел (строк и столбцов матрицы яркостей пикселя) (Рисунок 2.7).

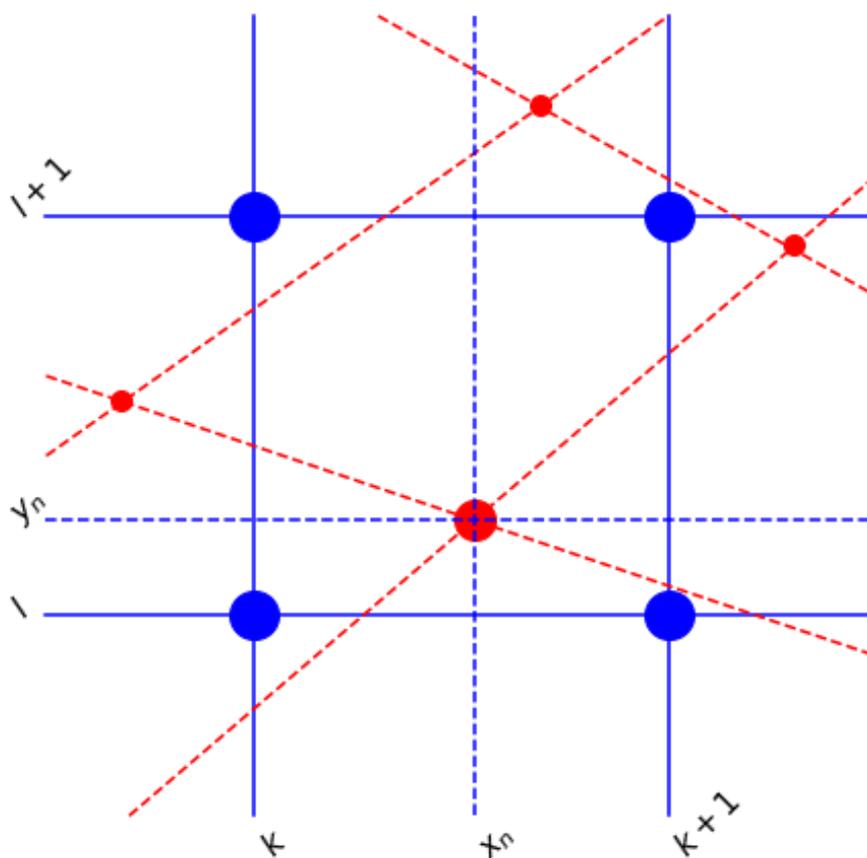


Рисунок 2.7 – Схема взаимного расположения узлов дискретизации и элементов изображения

Синие узлы на Рисунке 2.7 соответствуют элементам изображения – значения яркостей пикселей в пересечениях строк $l, l+1$ и столбцов $k, k+1$. Крупный красный маркер соответствует узлу аппроксимационной сетки, заключенному между строками $l, l+1$ и столбцами $k, k+1$. Красные пунктирные линии соответствуют отрезкам, обуславливающим положения узлов аппроксимирующей сетки. Тогда на основе значений матрицы яркости

изображения I значение яркости в узле аппроксимационной сетки $b_{\text{узл}}$, заключенном между строками $l, l+1$ и столбцами $k, k+1$ рассчитывается на основе выражения билинейной интерполяции:

$$b_{\text{узл}} = I_{k,l} + (I_{k+1,l} - I_{k,l}) \cdot (x_n - k) + (I_{k,l+1} + (I_{k+1,l+1} - I_{k,l+1}) \cdot (x_n - k) - I_{k,l} - (I_{k+1,l} - I_{k,l}) \cdot (x_n - k)) \cdot (y_n - l), \quad (2.12)$$

где $I_{k,l}$ – значения в матрице яркости изображения I в столбце k и строке l , x_n, y_n – координаты узла, определённого по алгоритму (Рисунок 2.5), k, l – ближайшие целые оценки снизу координат узла, определяющие номера строки и столбца.

Таким образом описаны все необходимые алгоритмы и выражения, необходимые для формирования объекта, для которого применим почти периодический анализ, обуславливающего согласованность со структурой исследуемой области. Возникает возможность формирования алгоритма отображения матрицы яркости изображения $I_{M \times N}$ в матрицу линеаризованных данных $B_{NP \times NL}$ (Рисунок 2.8).

Таким образом, сформулирован алгоритм линеаризации визуальных данных на основе локальных полигональных представлений. Формируемая в результате алгоритма матрица линеаризованных данных выступает объектом, в отношении элементов (строк и столбцов) которого проводится почти периодический анализ.

Результаты почти периодического анализа представляют собой ритмические такты, определяющие интервалы единообразного поведения функции с упорядоченным аргументом. В рамках исследования линеаризованных данных почти периоды определяют структурную разметку системы на секторы прямоугольной формы. Для практической реализации результатов возникает задача описания алгоритма, формирующего воспроизведение структурной разметки выявленных границ на исследуемых данных.

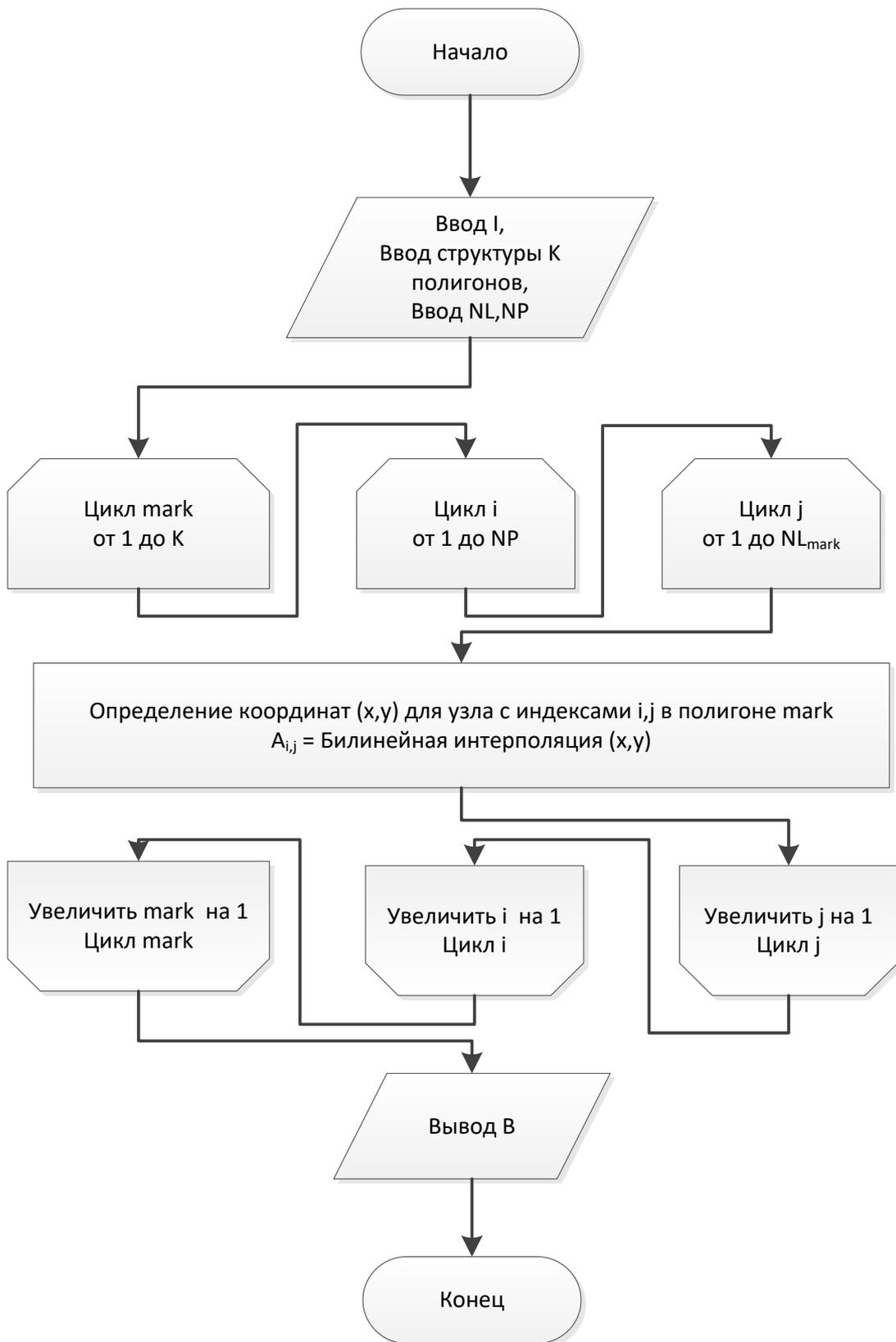


Рисунок 2.8 – Схема алгоритма расчета значений матрицы линеаризованных данных

Опишем основной подход к воспроизведению границ, представляющих собой отрезки, соединяющие противоположные стороны четырехугольников полигонов, на пространство исходного изображения на основе координат вершин полигона.

Для полигона с координатами вершин (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) и (x_4, y_4) с заданной поперечной частотой дискретизации N граница по i -ому срезу проходит по отрезку, соединяющему точки $\left(x_1 + i \cdot \frac{x_2 - x_1}{N}, y_1 + i \cdot \frac{y_2 - y_1}{N}\right)$ и $\left(x_3 + i \cdot \frac{x_4 - x_3}{N}, y_3 + i \cdot \frac{y_4 - y_3}{N}\right)$. Разметка взаимного расположения вершин полигона и воспроизведение произвольной поперечной границы приводится на Рисунке 2.9.

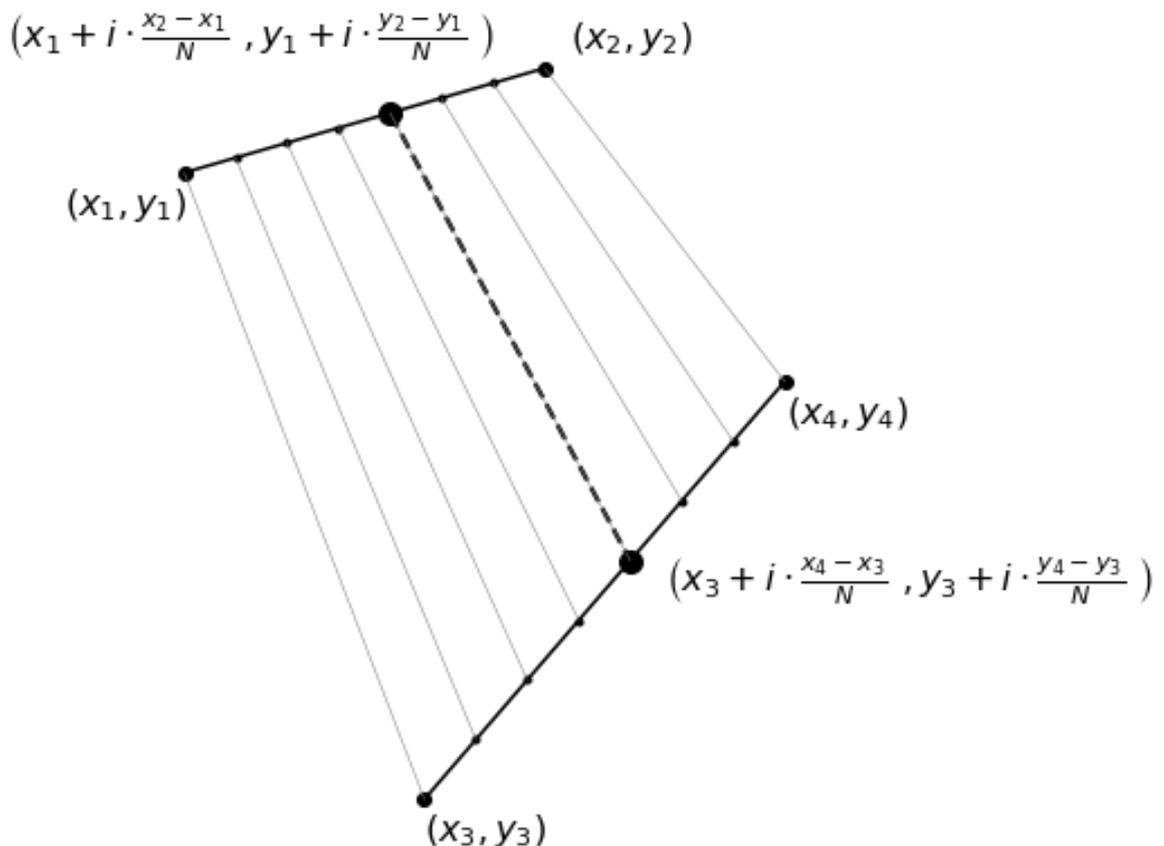


Рисунок 2.9 – Воспроизведение продольной границы в полигоне

Таким образом, для проведения продольных границ структурной сегментации в каждом полигоне последовательно проводятся i -ые отрезки. Так, пример 8-ой продольной границы (чёрная пунктирная ломанная линия) для деления полигонов из 10 условных полос приводится на Рисунке 2.10.

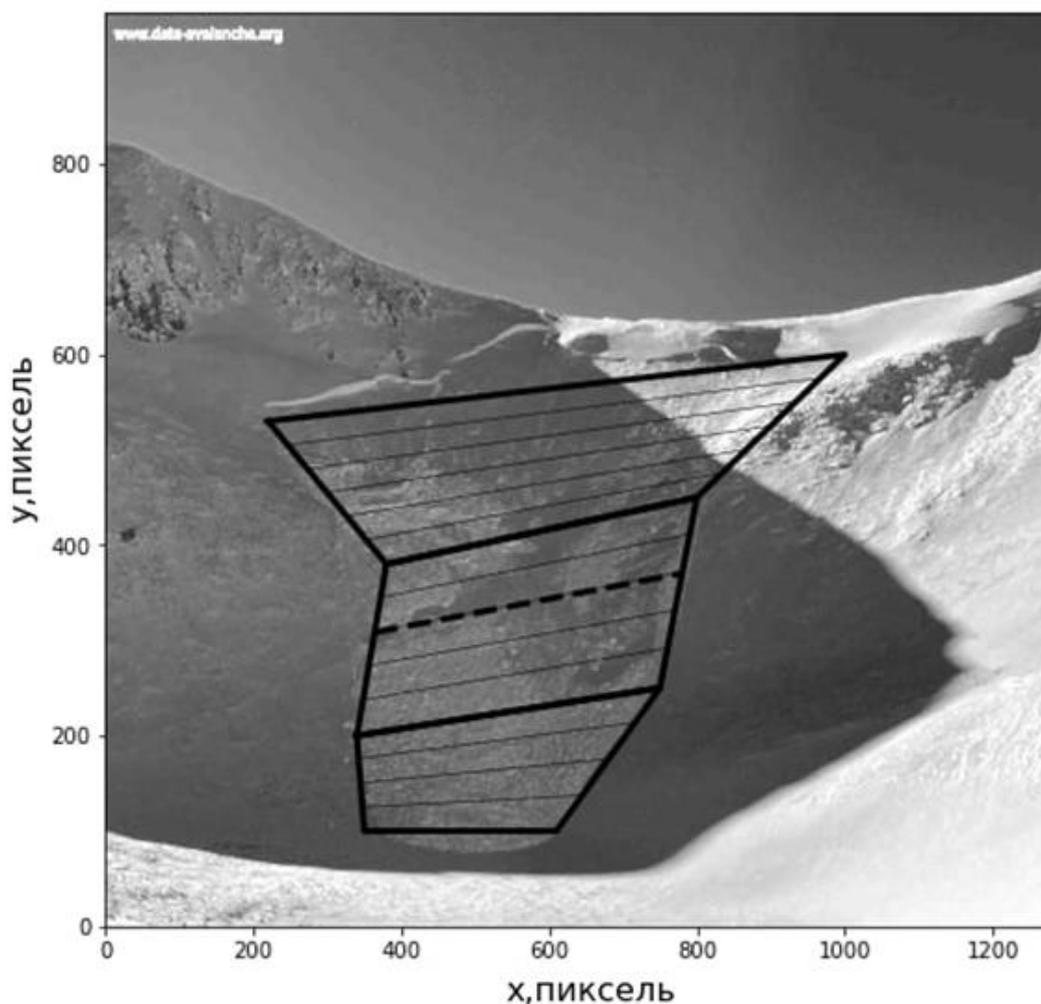


Рисунок 2.10 – Воспроизведение продольной границы в системе полигонов в пространстве исследуемого изображения

В случае построения поперечных границ отрезок строится в полигоне с частотой продольной дискретизации M по j -ому срезу между точками с координатами $\left(x_1 + j \cdot \frac{x_3 - x_1}{M}, y_1 + j \cdot \frac{y_3 - y_1}{M}\right)$ и $\left(x_2 + j \cdot \frac{x_4 - x_2}{M}, y_2 + j \cdot \frac{y_4 - y_2}{M}\right)$.

Так, вторая граница для 7 продольных секторов внутри полигона приводится на Рисунке 2.11.

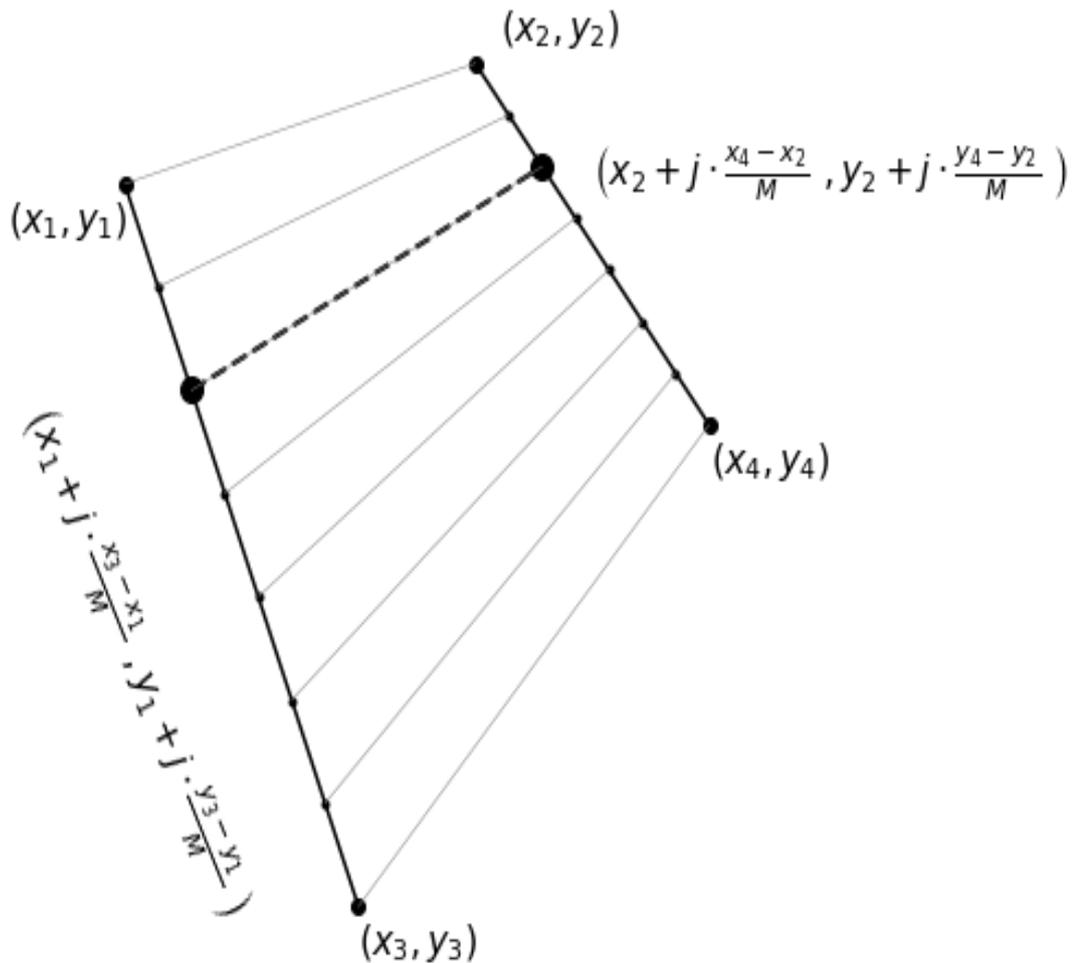


Рисунок 2.11 – Воспроизведение поперечной границы в полигоне

Для воспроизведения j -ой поперечной границы в структуре последовательности полигонов с продольными частотами дискретизации Nl_i требуется определить номер полигона p на основе неравенства $\sum_{i=0}^{p-1} Nl_i < j \leq \sum_{i=0}^p Nl_i$. Тогда в p -ом полигоне с частотой дискретизации Nl_p проводится j -ый срез.

Так, пример 8-ой поперечной границы, представленной в виде чёрного пунктирного отрезка, приводится на Рисунке 2.12.

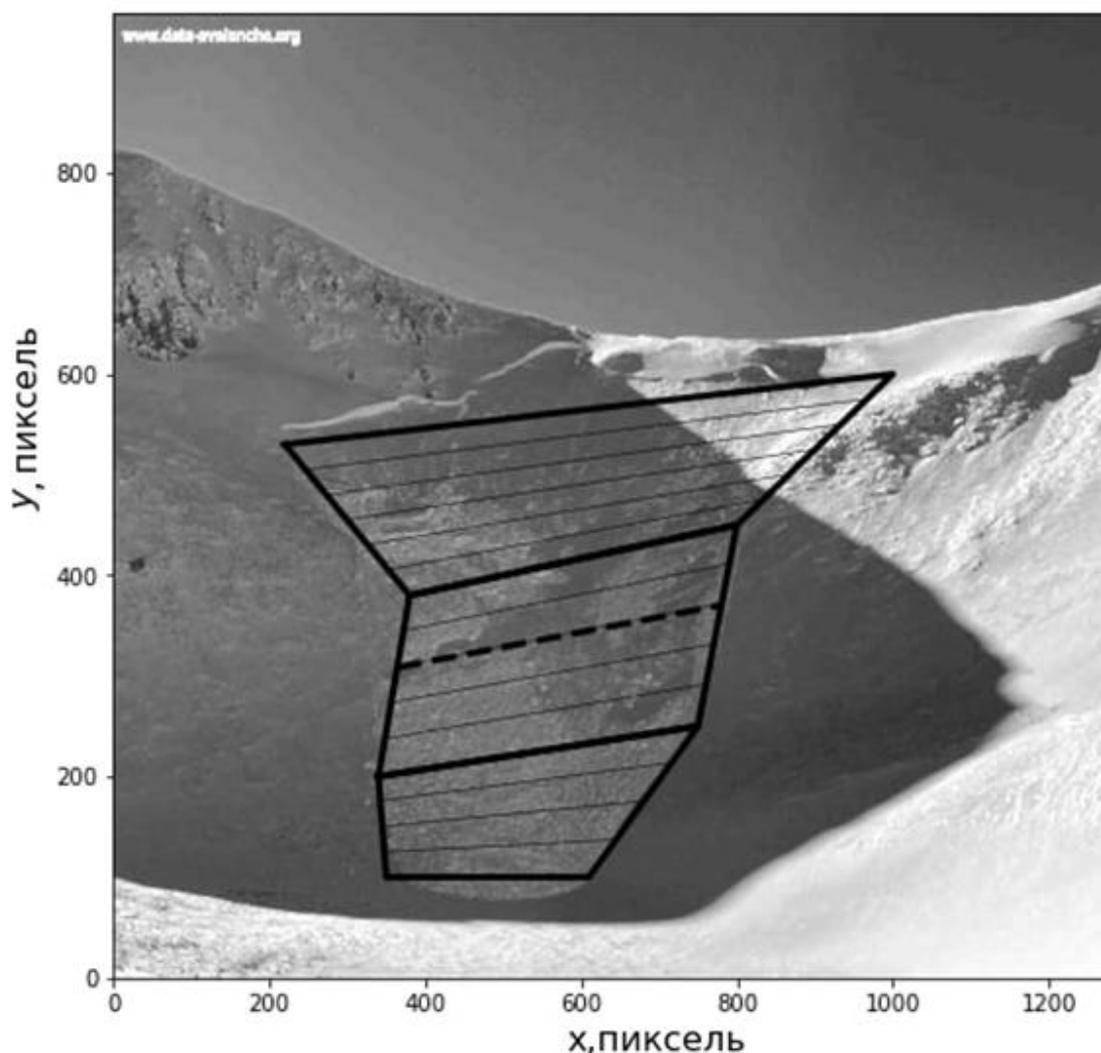


Рисунок 2.12 – Воспроизведение поперечной границы в системе полигонов в пространстве исследуемого изображения

Таким образом, описаны принципы построения продольных и поперечных границ внутри систем полигонов.

Для построения системы ритмичной структуризации требуется описать алгоритм, воспроизводящий границы в равномерном тактовом режиме.

Для разметки регулярной тактовой системы продольных почти периодов величиной Tl и поперечных почти периодов Tt в структуре из P линеаризующих полигонов с заданными частотами поперечной дискретизации Np и системой продольных дискретизаций Nl_i описан алгоритм, схема которого приводится на Рисунке 2.13:

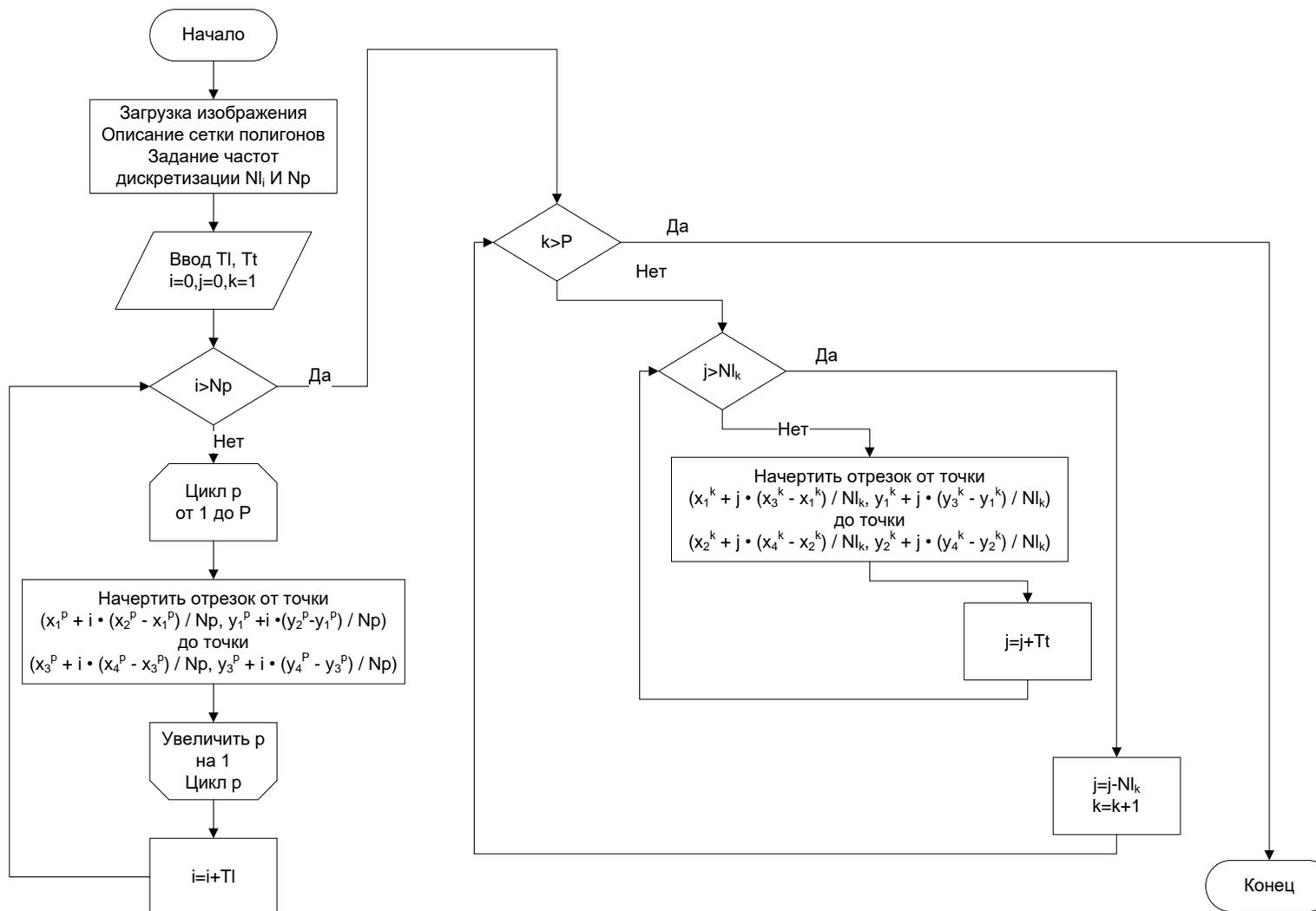


Рисунок 2.13– Схема алгоритма воспроизведения структурной сегментации исследуемого объекта на исходных данных

На схеме алгоритма Nl_i – продольная частота дискретизации i -го полигона; Np – поперечная частота дискретизации системы полигонов, Tl – величина поперечного почти периода, Tt – величина продольного почти периода, i, j, k – вспомогательные переменные-итераторы, p – переменная номера полигона, P – количество полигонов, x_i^j, y_i^j – i -ые ($i=1,2,3,4$) координаты j -го полигона, взаиморасположение которых определяли согласно схеме на Рисунке 2.9.

Пример реализации алгоритма приводится на изображении лавины для сетки, основанной на 3 полигонах с поперечной частотой дискретизации в 300 узлов, и продольной дискретизации суммарно в 600 узлов с распределением по 200, 250 и 150 узлов соответственно. Воспроизведение поперечного почти периода в 87 узлов дискретизации и продольного почти периода в 155 узлов дискретизации представлено на Рисунке 2.14:

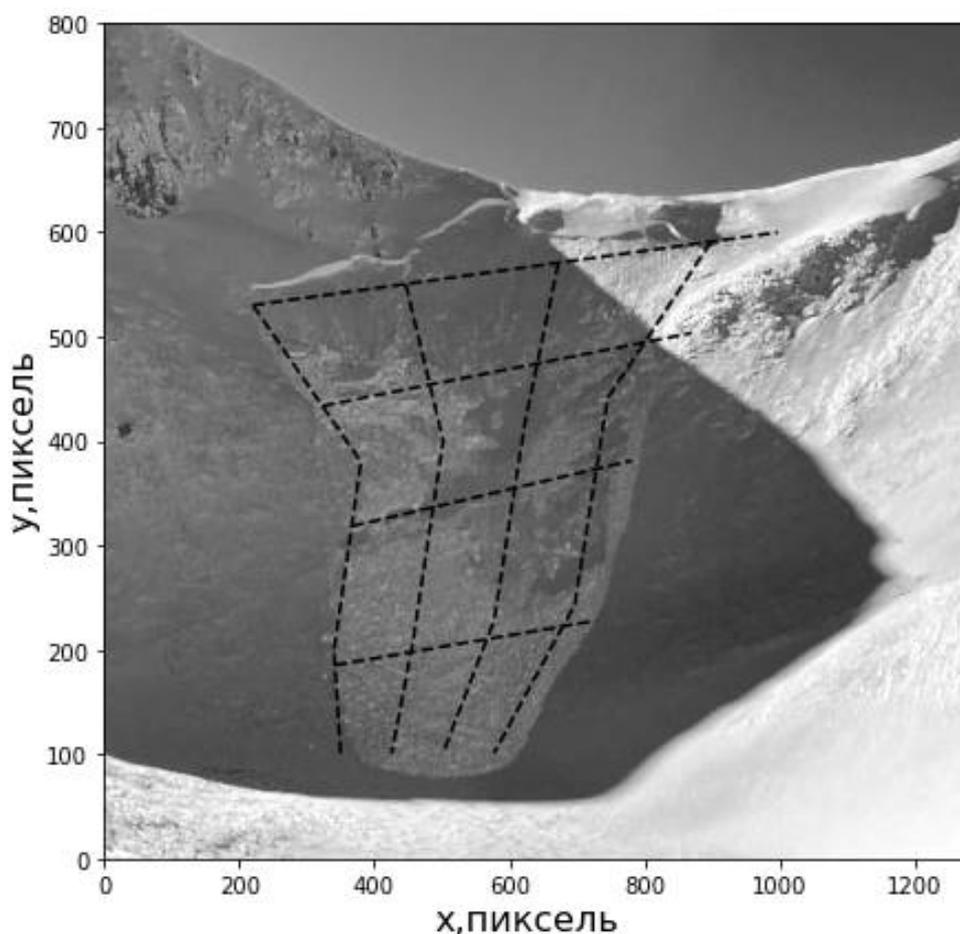


Рисунок 2.14 – Графическое представление разметки продольного и поперечного почти периодов в пространстве исследуемого изображения

Таким образом, описаны принципы построения продольных и поперечных границ внутри систем полигонов. Для построения системы ритмичной структуризации описан алгоритм, воспроизводящий границы в равномерном тактовом режиме в пространстве анализируемого изображения.

2.4 Алгоритмы статистической предобработки данных о снежном покрове

Лавиноопасные территории являются горными, с преобладающей контрастной крутизной рельефа, которая нередко является причиной возникновения теней – особенно если съёмка ведется в условиях низкого положения Солнца по отношению к горизонту. Влияние теней на значения яркости отдельных областей представлено уменьшением значений яркостей, представленных абсолютными значениями матрицы яркости изображения, и снижением контрастности, представленной локальной дисперсией областей данных. Таким образом, теневые артефакты могут искажать результаты применяемых алгоритмов анализа [107, 160].

Пример существенно затенённого изображения части горного хребта с нанесенной структурой аппроксимирующих полигонов представлен на Рисунке 2.15.

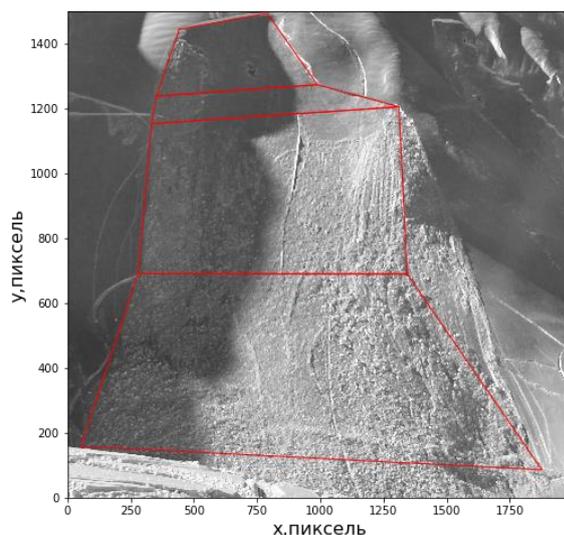


Рисунок 2.15 – Изображение существенно затенённой области с разметкой аппроксимирующих полигонов

Линеаризованная структура, полученная в результате применения алгоритма, приведённого на Рисунке 2.8 по отношению к введённой структуре полигонов (Рисунок 2.15), приведена с графиком контрольного столбца на Рисунке 2.16.

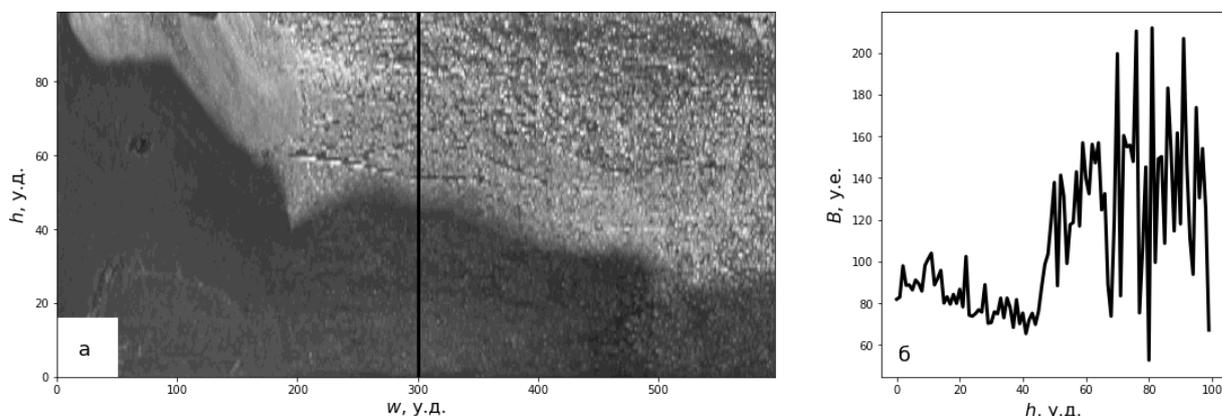


Рисунок 2.16 – Графическое представление затенённых данных (а – графическое представление линеаризованной структуры лавины (h – номер строки линеаризующей сетки, w – номер столбца линеаризующей сетки), б – график контрольного столбца линеаризованной структуры лавины (B – величина яркости изображения в узлах сетки линеаризованных данных))

Установлено, что исследуемые данные существенно подвержены воздействию теневого артефакта – на Рисунке 2.16(а) его площадь составляет 53% общего пространства исследуемой области.

На Рисунке 2.16(б) показан график контрольного столбца рисунка 2.16(а), на котором обнаружен пороговый переход от области теневого артефакта (значения яркости в ней не превышают 120) к области данных, свободных от влияния тени. Важно отметить, что общая тенденция поведения трендов этих частей носила единый характер – с увеличением аргумента средняя яркость узлов дискретизации незначительно уменьшалась. Для нивелирования воздействия затенения в целях синхронизации теневого и светлого участков предложено применение фильтров данных.

В рамках данного исследования описаны алгоритмы коррекции яркости узлов дискретизации: адаптивная коррекция гаммы с учётом локального среднего, стандартизация разнородных частей изображения и алгоритм выравнивания моментов

При предобработке данных с применением алгоритма гамма-коррекции изменению подвергалась только часть изображения, подверженная влиянию теневых артефактов. Значения данных яркости узлов дискретизации преобразовались согласно выражению:

$$B_{ск} = B + \overline{B_{pos}} - \overline{B_{neg}}, \quad (2.13)$$

где $B_{ск}$ – преобразованное значение яркости; B – исходное значение яркости; $\overline{B_{pos}}$ – среднее значение яркости узлов дискретизации, свободных от влияния теневого артефакта; $\overline{B_{neg}}$ – среднее значение яркости узлов дискретизации в области теневого артефакта.

Для проведения процедуры создан алгоритм, представленный в графическом виде на Рисунке 2.17.

Алгоритм включал два основных этапа – на первом этапе вычислялись статистические характеристик средних значений для области, соответствующей теневого артефакту, и для области, свободной от теневого воздействия. Структура этапа представляла вложенный цикл, в котором внешний цикл отвечал за последовательный безусловный перебор всех значений пространственного аргумента исходных данных w , а внутренний цикл отвечал за расчёт средних величин разнородных по отношению к воздействию теневых артефактов областей. Так, пока величина яркости обрабатываемого узла дискретизации не превышала порога lim (определённого в 120 у.е.), среднюю величину пересчитывали для области теневых артефактов, а после превышения порога – расчёт вёли для области изображения, свободной от воздействия тени.

На втором этапе исполняли изменение яркости узлов дискретизации для области теневых артефактов.

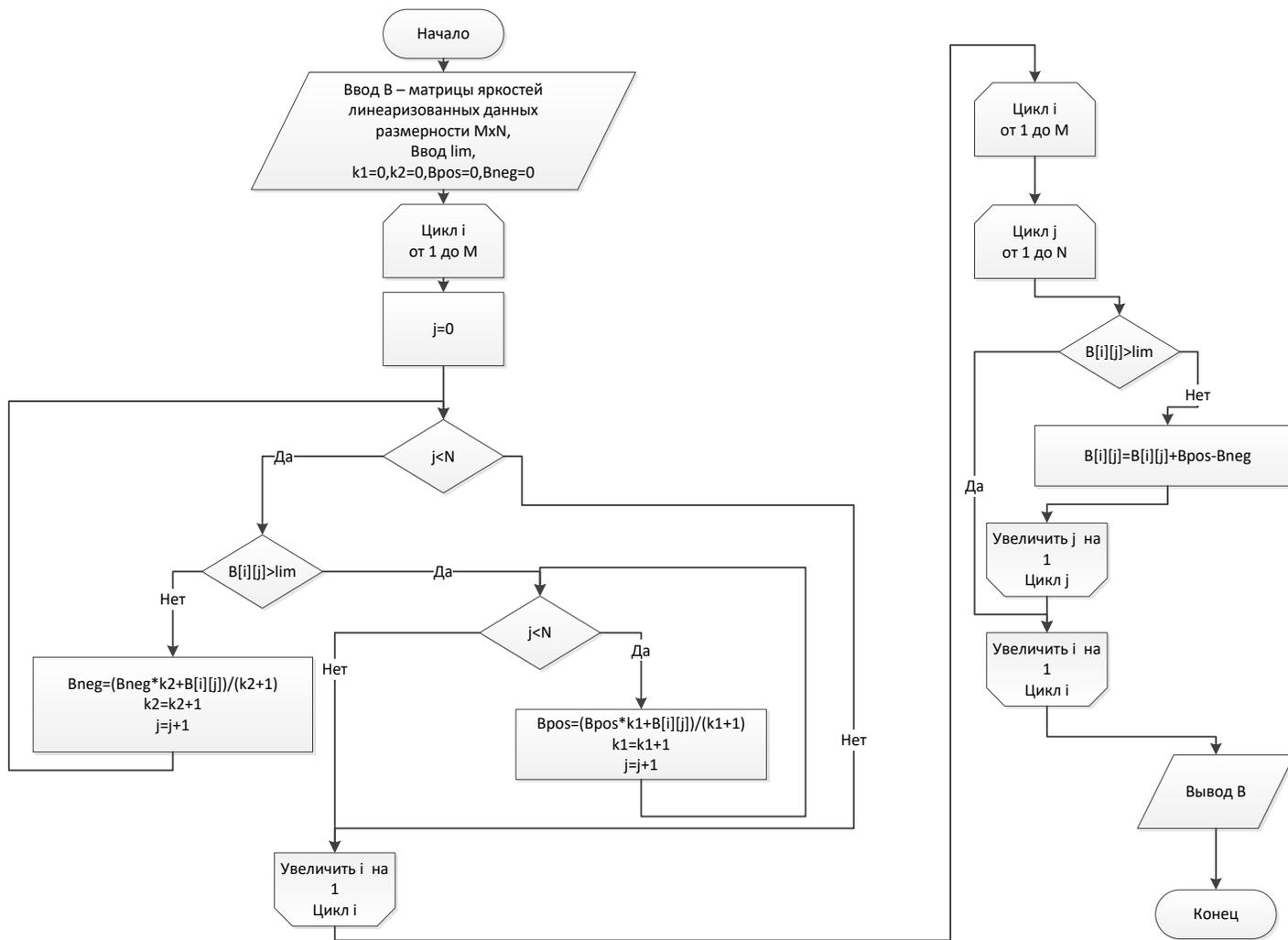


Рисунок 2.17 – Схема алгоритма гамма-коррекции

Его структура представляла вложенный цикл, в котором внешний цикл отвечал за последовательный безусловный перебор всех значений пространственного аргумента исходных данных w , а внутренний цикл выполнял операции преобразования яркости узлов дискретизации согласно выражению (2.13) в области теневых артефактов.

Результаты применения алгоритма гамма-коррекции к исходным данным приведены на Рисунке 2.18.

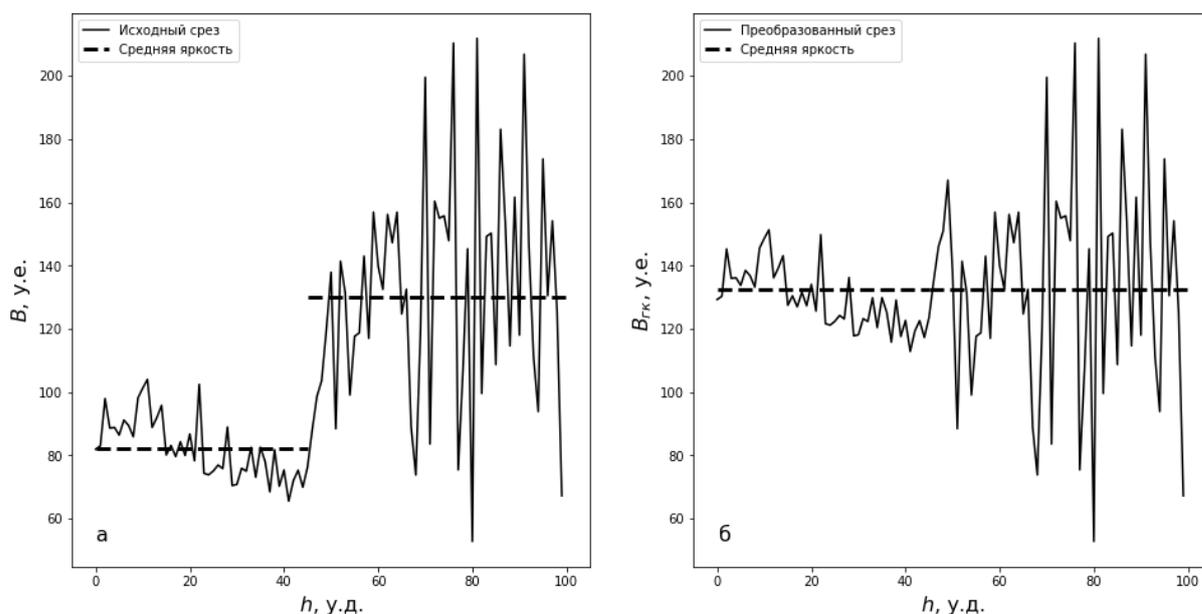


Рисунок 2.18 – Результаты гамма-коррекции (а – график контрольного столбца с разметкой средних значений яркости узлов дискретизации разнородных областей данных, б – график контрольного столбца, преобразованного согласно выражению (2.13) с разметкой средних значений яркости узлов дискретизации)

На Рисунке 2.18(а) изображён контрольный столбец оригинальной линеаризации, а также проведены пунктирные линии на уровнях средних значений яркости теневой (в данном столбце – до значения аргумента координаты $h=45$ узлов дискретизации) и незатемнённой зон. На Рисунке 2.18(б) приведён контрольный столбец данных, обработанных согласно алгоритму. Установлено, что положения средних значений яркостей узлов дискретизации в разнородных по влиянию теневых артефактов областях выровнялись. Так же обнаружена разница в величине разброса данных яркости узлов дискретизации от средних значений – для области аргумента

$h \leq 45$, соответствующей зоне теневого артефакта, разброс яркости узлов дискретизации меньше, чем для оставшейся области

Для реализации синхронизации величин разбросов и средних значений предлагалась стандартизация теневой и незатенённой частей.

Тогда выполнялось преобразование как среднего значения, так и величины разброса, выраженного среднеквадратичным отклонением (СКО). Преобразование данных яркости узлов дискретизации выполнялось согласно выражению:

$$B_{cm} = (B - \mu_B) / \sigma_B, \quad (2.14)$$

где B_{cm} – преобразованное значение яркости; B – исходное значение яркости; μ_B – среднее значение яркости преобразуемой области; σ_B – СКО яркости преобразуемой области.

Для процедуры стандартизации описан алгоритм и представлен в графическом виде на Рисунке 2.19.

Алгоритм содержал два основных этапа. Первый этап заключался в разделении множества исходных узлов дискретизации на непересекающиеся подмножества узлов дискретизации подверженных влиянию теневых артефактов, и свободных от этого влияния. Структура этапа представлена вложенным циклом, внешний цикл которого описывал последовательный перебор величин аргумента w исходного набора данных, а внутренний цикл формировал два набора данных B_{pos} и B_{neg} – свободных от влияния теневых артефактов узлов дискретизации, и подвластных влиянию теневых артефактов узлов дискретизации соответственно.

Затем выполнялась процедура вычисления статистических характеристик полученных наборов. Ввиду регулярного характера вычислений величин средних значений и СКО операция была принята атомарной.

На втором этапе реализовывали преобразование (2.14) к узлам дискретизации в соответствии с установленным разбиением на подмножества

подверженных воздействию теневого артефакта и свободных от воздействия теневого артефакта.

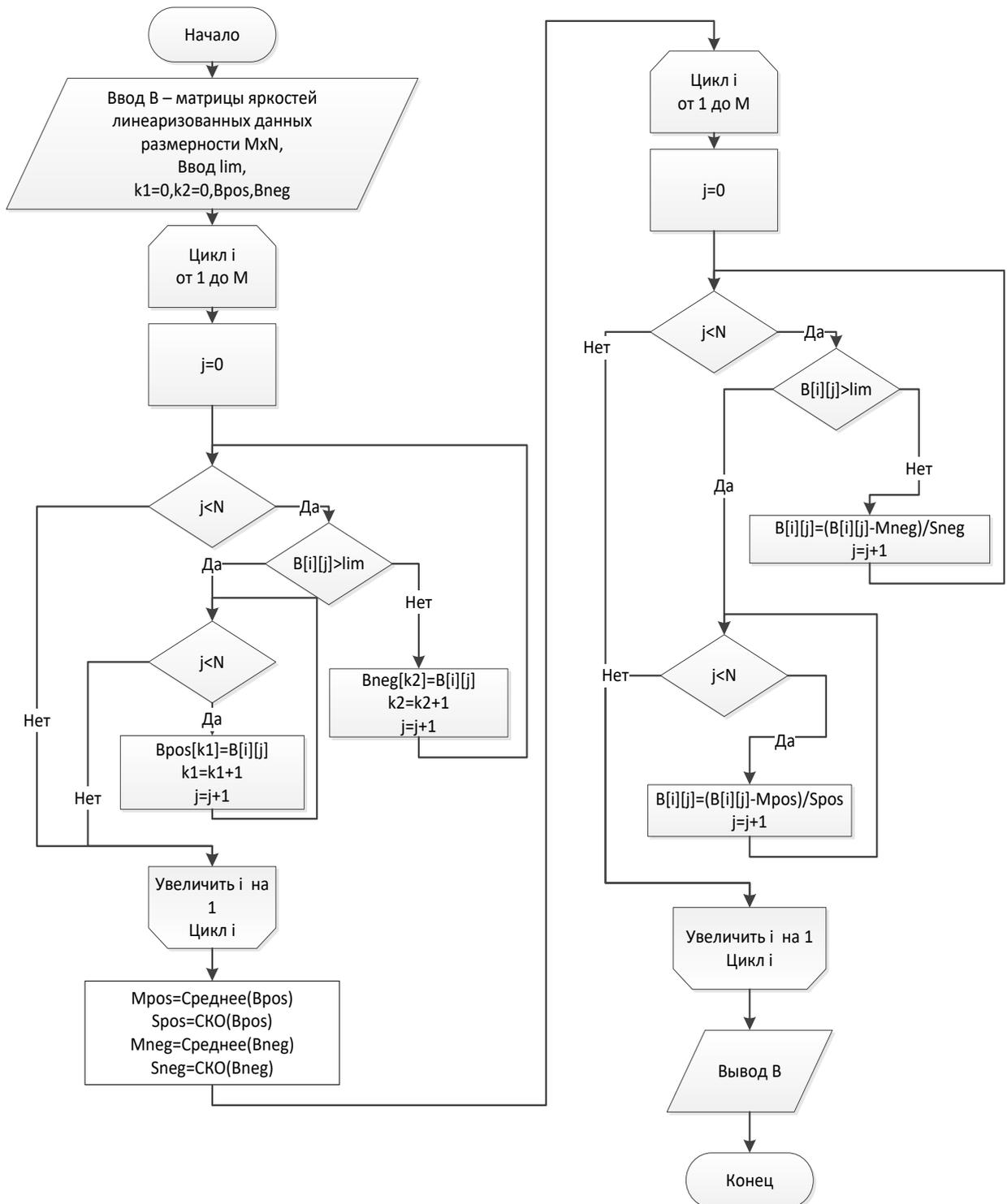


Рисунок 2.19 – Схема алгоритма стандартизации разнородных частей

Сопоставление результатов применения алгоритма, приведенного на Рисунке 2.19, к набору исходных данных приведено на Рисунке 2.20.

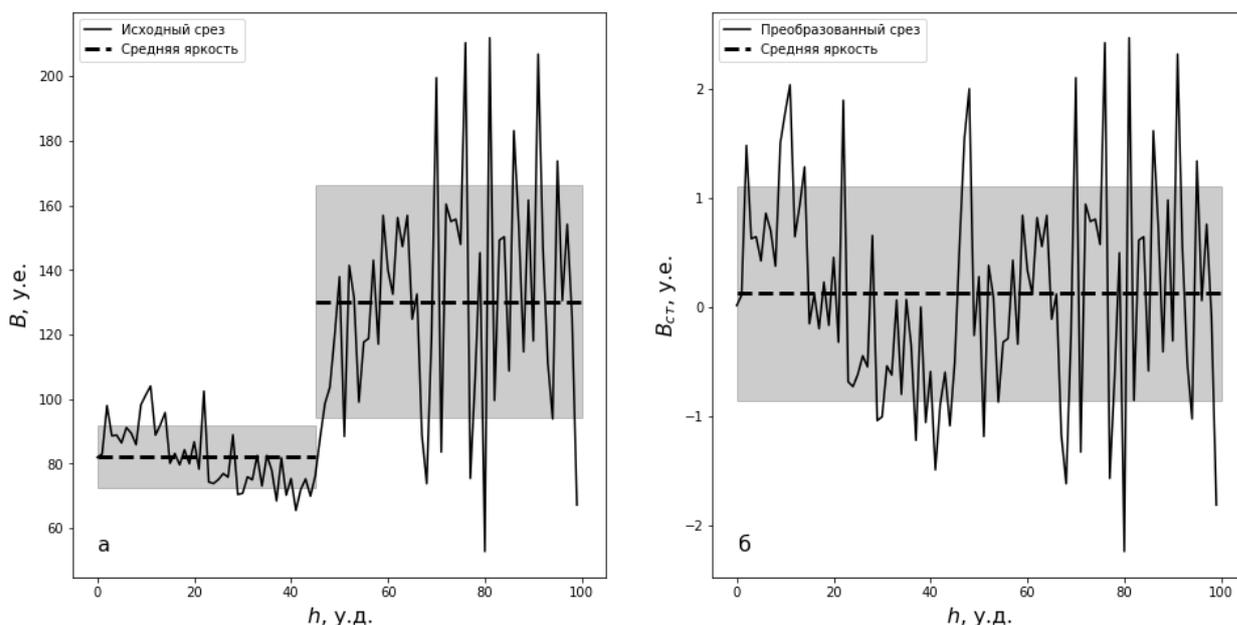


Рисунок 2.20 – Результаты стандартизации (а – график контрольного столбца с разметкой средних значений и СКО разнородных областей данных, б – график контрольного столбца, преобразованного согласно алгоритму стандартизации с разметкой средних значений и СКО)

На Рисунке 2.20(а) приведён исходный контрольный столбец с проведёнными пунктирными линиями на уровне средних величин яркости теневой и незатемнённой зон и серыми каналами, отображающими разброс на величину среднеквадратичного отклонения от средних значений яркостей. Выявлено расхождение положений и толщины каналов.

На Рисунке 2.20(б) приведены результаты применения алгоритма стандартизации – данные, относящиеся к разным областям, выровнялись на уровне среднего значения 0, а величины их отклонений масштабировались до величины 1. Таким образом, данные разнородных по влиянию теневых артефактов областей были сведены к единому масштабу средней величины и величины разброса, установлена синхронизация положений каналов разброса значений.

Стоит отметить, что стандартизация является классической процедурой предобработки данных, и её применение приводит данные к

унифицированному диапазону с потерей статистических характеристик средних значений, что не всегда удобно для последующей визуализации или интеграции с другими наборами данных, имеющими собственные диапазоны яркости.

В таком случае выравнивание статистических характеристик возможно выполнить через преобразование, изменяющее статистические моменты области теневого артефакта на основе статистических характеристик области, свободной от его влияния. Выражение, описывающее такое преобразование, приведено в виде:

$$B_{эм} = \frac{(B - \mu_{neg})}{\sigma_{neg}} \cdot \sigma_{pos} + \mu_{pos}, \quad (2.15)$$

где $B_{эм}$ – преобразованное значение яркости; B – исходное значение яркости; μ_{neg} – среднее значение яркости узлов дискретизации в области теневого артефакта; σ_{neg} – СКО яркости узлов дискретизации в области теневого артефакта; μ_{pos} – среднее значение яркости узлов дискретизации области, свободной от влияния теневого артефакта; σ_{pos} – СКО яркости узлов в области, свободной от влияния теневого артефакта.

Такое преобразование передаёт статистические моменты первого и второго порядка за счёт исключения из изначального набора данных яркости узлов дискретизации, принадлежащих области теневого артефакта, среднего значения и дисперсии процедурой стандартизации, и последующим масштабированием, кратным разбросу яркости области, свободной от влияния теневого артефакта, и сдвигом на величину средней яркости сти, свободной от влияния теневого артефакта.

Алгоритм, реализующий описанное преобразование, представлен в графическом виде на Рисунке 2.21.

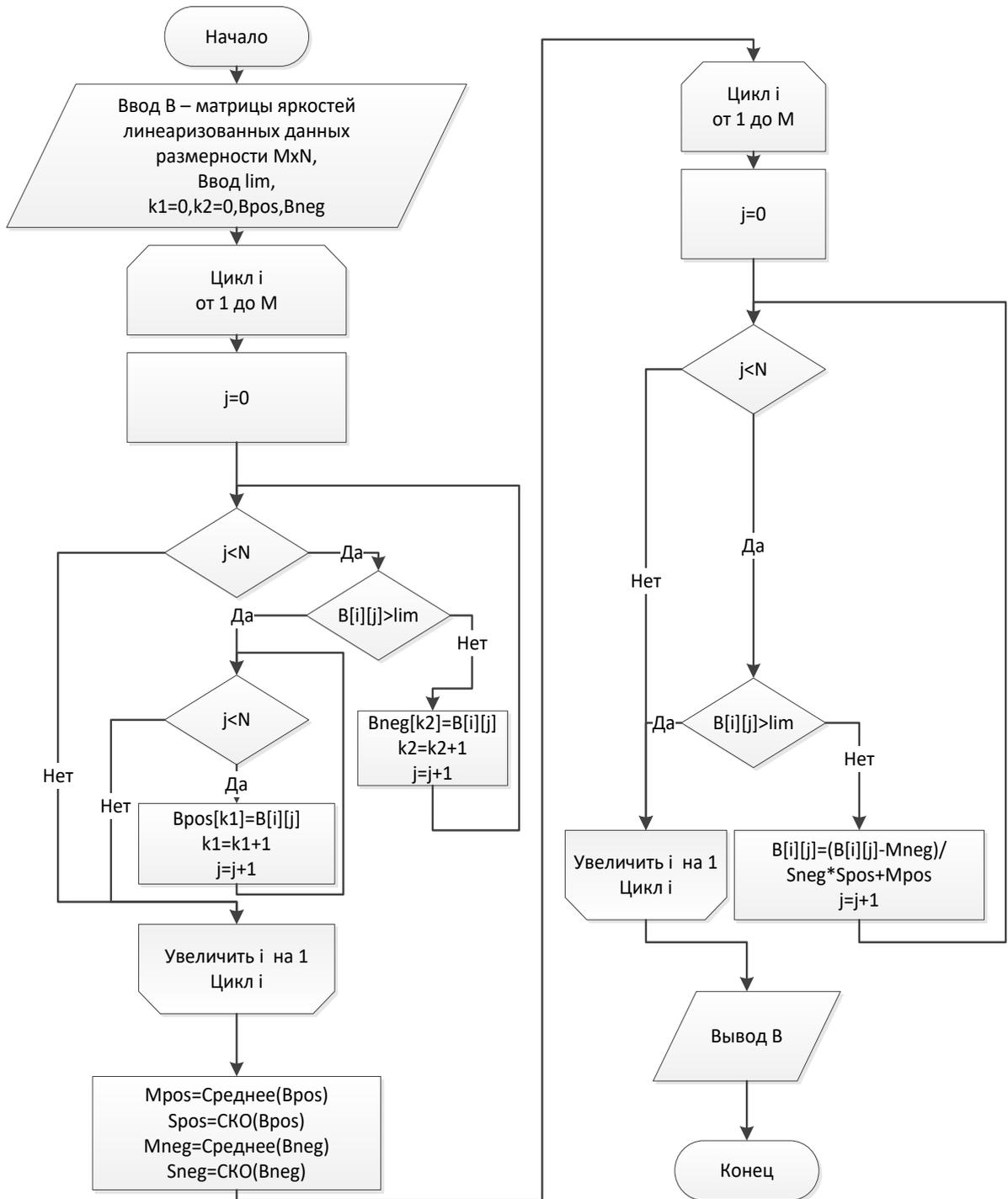


Рисунок 2.21 – Схема алгоритма выравнивания моментов

Структура алгоритма включала два основных этапа. На первом этапе узлы дискретизации разделяли на подмножества по признаку влияния теневого артефакта с применением вложенного цикла.

Второй этап через вложенный цикл реализовал преобразование по выражению (2.15) к данным, относящимся к области теневого артефакта.

На Рисунке 2.22(а) приведён исходный контрольный столбец с проведёнными пунктирными линиями на уровне средних величин яркости теневой и незатемнённой зон и серыми каналами, отображающими разброс на величину среднеквадратичного отклонения от средних значений яркостей. Выявлено расхождение положений и толщины каналов.

На Рисунке 2.22(б) продемонстрированы результаты применения алгоритма выравнивания моментов – данные, относящиеся к разным областям, выровнялись на уровне среднего значения области, не подверженной теневому артефакту, а величины их отклонений масштабировались до равных значений. Таким образом, данные разнородных по влиянию теневых артефактов областей были сведены к единому масштабу средней величины и величины разброса, установлена синхронизация положений каналов разброса значений.

На Рисунке 2.23 представлены изменения, полученные в результате применения описанных алгоритмов предобработки данных. Алгоритмы предобработки выравнивали средние значения яркостей разнородных по влиянию теневых артефактов областей, приведённых на Рисунке 2.23(а). Рисунок 2.23(б) показывал график контрольного столбца рисунка 2.16(а) по значению аргумента $w=300$ узлов дискретизации (обозначен на Рисунке 2.16(а) чёрной вертикальной линией).

Рисунок 2.23(в) представляет графическое представление структуры после применения алгоритма гамма-коррекции. Установлено, что применение алгоритма гамма-коррекции, приведенного на Рисунке 2.17,

увеличило общую яркость изображения, но оставило контрастность области теневых артефактов слабо выраженной.

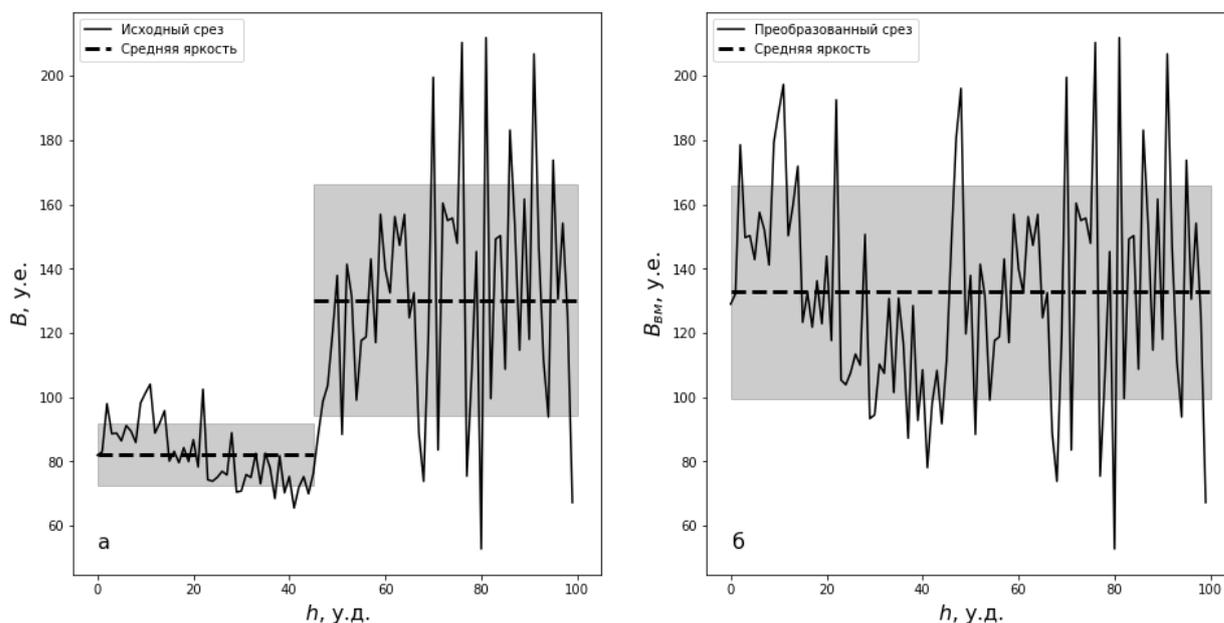


Рисунок 2.22 – Результаты применения алгоритма выравнивания моментов (а – график контрольного столбца с разметкой средних значений и СКО разнородных областей данных, б – график контрольного столбца, преобразованного согласно алгоритму выравнивания моментов с разметкой средних значений и СКО)

Это справедливо и для данных, представленных на Рисунке 2.23(г): размах амплитуд отклонений от тренда в области аргумента h до значения 45 узлов дискретизации заметно меньше, чем размах амплитуд отклонения от среднего значения после порогового значения аргумента.

На Рисунке 2.23(д) приведено графическое представление структуры после применения алгоритма стандартизации. Установлено, что стандартизация привела данные к единой яркости и контрастности, статистически соответствующих нормальному распределению – так, на Рисунке 2.23(е) наблюдается равномерный характер поведения данных в положениях средних величин и разброса значений преобразованных данных яркости.

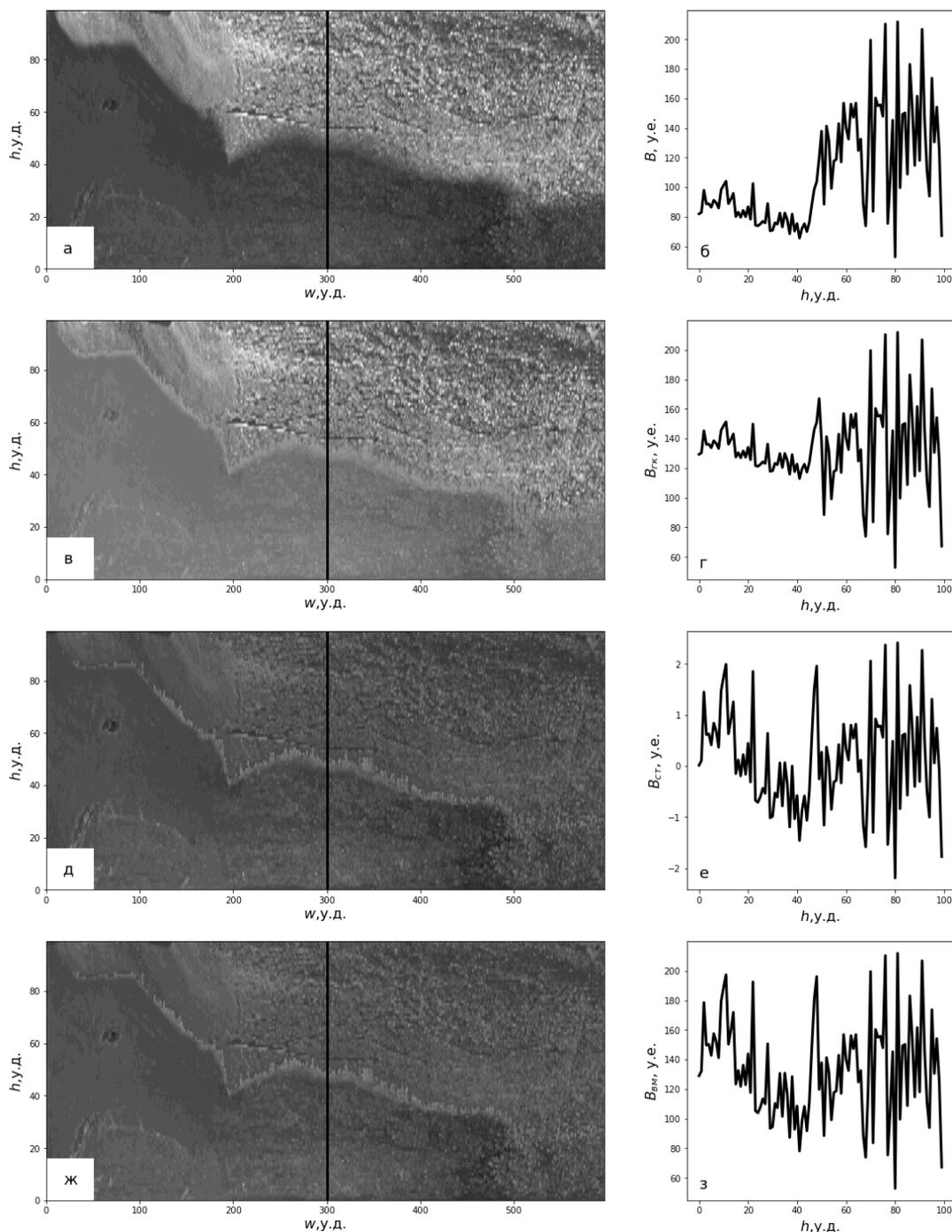


Рисунок 2.23 – Графическое представление данных и контрольных столбцов – исходного, выровненных средних и стандартизованных значений (а – исходная линейризованная структура, б – контрольный столбец исходной структуры, в – результат применения алгоритма гамма-коррекции к исходным данным, г – контрольный столбец структуры после применения алгоритма гамма-коррекции, д – результат применения алгоритма стандартизации к исходным данным, е – контрольный столбец линейризованной структуры после применения алгоритма стандартизации, ж – результат применения алгоритма выравнивания моментов к исходным данным, з – контрольный столбец линейризованной структуры после применения алгоритма выравнивания моментов)

На Рисунке 2.23(ж) приведено графическое представление структуры после применения алгоритма выравнивания моментов. Установлено, что алгоритм привел данные к единой яркости и контрастности, характерных для области, свободной от воздействия теневого артефакта – так, на Рисунке 2.23(е) наблюдается равномерный характер поведения данных в положениях средних величин и разброса значений преобразованных данных яркости.

Для оценки степени сохранения информации избран набор метрик, характеризующих степень схожести данных. Первой метрикой стало пиковое соотношение сигнала к шуму (PSNR), которое показывало отношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума, искажающего сигнал. Метрика определяла меру искажения данных в логарифмической шкале. Зависимость величины метрики от искажений носила обратный характер – чем больше искажение, тем меньше величина оценки. Для расчёта величины PSNR применялось выражение:

$$PSNR(A) = 20 \lg \left(\frac{255}{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |B_{ij} - A_{ij}|^2} \right), \quad (2.16)$$

где A – матрица яркостей узлов дискретизации, преобразованных алгоритмом; B – исходная матрица яркостей узлов дискретизации, m, n – размерности матриц.

Метрикой, способной оценить структурные сходства между изображениями, учитывающей компоненты яркости, контрастности и структуры, принята оценка индекса структурного сходства (SSIM). Значения метрики находились в диапазоне $[-1; 1]$, где 1 соответствует оценке точного повторения оригинала и результата обработки алгоритмами, 0 – отсутствие структурной связи, а -1 соответствует полной инверсии значений яркости. Для вычисления значений метрики SSIM применялось выражение:

$$SSIM(A) = \frac{\left(2\mu_A\mu_B + (0.01 \max(B))^2\right) \cdot \left(2\sigma_{AB} + (0.03 \max(B))^2\right)}{\left(\mu_A^2 + \mu_B^2 + (0.01 \max(B))^2\right) \cdot \left(\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + (0.03 \max(B))^2\right)}, \quad (2.17)$$

где A – матрица яркостей узлов дискретизации, преобразованных алгоритмом; B – исходная матрица яркостей узлов дискретизации; $\max(B)$ – максимальная яркость узла дискретизации исходной матрицы; μ_A – среднее значение матрицы яркостей узлов дискретизации, преобразованных алгоритмом; μ_B – среднее значение исходной матрицы яркостей узлов дискретизации; σ_{AB} – ковариация матриц яркостей узлов дискретизации – исходной и преобразованной алгоритмом; σ_A – дисперсия матрицы яркостей узлов дискретизации, преобразованных алгоритмом; σ_B – дисперсия исходной матрицы яркостей узлов дискретизации.

Регулярной метрикой, применяемой для оценки сходства наборов данных, выражающей меру линейной зависимости между исходными и обработанными значениями, стала метрика коэффициента корреляции Пирсона (R). Значения оценки находились в интервале $[-1;1]$, где 1 соответствовала строгой прямой линейной зависимости между наборами данных, 0 показывал отсутствие линейной зависимости, -1 – соответствовала строгой обратной линейной зависимости между наборами данных. Для вычисления коэффициента корреляции применялось выражение:

$$R(A) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{ij} - \mu_A) \cdot (B_{ij} - \mu_B)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{ij} - \mu_A)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (B_{ij} - \mu_B)^2}}, \quad (2.16)$$

где A – матрица яркостей узлов дискретизации, преобразованных алгоритмом; B – исходная матрица яркостей узлов дискретизации; μ_A – среднее значение матрицы яркостей узлов дискретизации, преобразованных алгоритмом; μ_B – среднее значение исходной матрицы яркостей узлов дискретизации.

Оценка сходства наборов исходных данных с данными, полученными в результате применения приведенных алгоритмов на основе выражений (2.14-2.16) приведена в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчетов

Метод предобработки данных	PSNR (дБ)	SSIM	R
Гамма-коррекция	17,317	0,902	0,727
Стандартизация	7,337	$-2 \cdot 10^{-4}$	0,655
Выравнивание моментов	16,693	0,714	0,655

Для численного выражения меры сходства избраны метрики безразмерного коэффициента корреляции Пирсона R, индекса структурного сходства SSIM, меры и пикового отношения сигнал/шум PSNR, измеряемого в децибелах. Установлено, что преобразование данных, подверженных существенному влиянию теневых артефактов, с применением алгоритмов гамма-коррекции, стандартизации и выравнивания моментов проведено без существенных потерь в линейных характеристиках.

Так, PSNR зафиксировала существенные изменения в структурах данных – это обуславливается объёмом теневого артефакта. Так же PSNR установила градацию степени схожести данных – так, гамма-коррекция показала наилучшее приближение к исходному набору данных, стандартизация имела оценку существенных отклонений, а алгоритм выравнивания моментов получил компромиссную оценку, существенно приближенную к оценке гамма-коррекции.

Подобные результаты показывает и метрика SSIM – так, гамма-коррекция показала существенное сходство результатов с исходным набором, стандартизация получила оценку, соответствующую радикальной реструктуризации, и даже инверсии данных, а выравнивание моментов оценивалось умеренной мерой отклонения результатов преобразования от

оригинала. Полученное значение коэффициента корреляции Пирсона R позволило установить высокую степень линейной связи данных, полученных в результате гамма-коррекции, и одинаковую умеренную степень линейной связи данных, полученных в результате выравнивания моментов и стандартизации. Равенство оценок последних двух методов предобработки данных связано в первую очередь с единообразными линейными преобразованиями, применяемыми в алгоритмах.

Таким образом, установлено, что стандартизация данных наиболее существенно деформировало их статистические характеристики, что значительно ухудшило метрики качества алгоритма. Так, в результате применения стандартизации получены значения, соответствующие отрицательной яркости, не предусмотренной исходной шкалой, что наверняка стало существенной основой для низких оценок качества.

Исследование статистических характеристик временных показателей алгоритма предобработки данных установило снижение среднего времени анализа наборов данных на 2,2 % для данных, полученных в результате применения гамма-коррекции, на 1 % для данных, полученных в результате применения стандартизации и на 2,5 % для данных, полученных в результате применения алгоритма выравнивания моментов. При этом также установлено улучшение стабильности алгоритма анализа данных по времени – величина доверительного интервала сократилась для набора данных, полученных с применением гамма-коррекции, на 25 %, а для набора данных, полученного с применением стандартизации на 30 %. Доверительный интервал времени исполнения метода исследования данных, полученных в результате выравнивания моментов, оказался на 40 % больше, чем доверительный интервал времени анализа исходных данных по соответствующему методу, однако положения средних значений времени с учётом доверительных интервалов не пересекаются [81].

Выводы по Главе 2

Разработан комплекс методов и алгоритмов, составляющих основу анализа данных о снежном покрове для формирования предиктивных признаков лавинной опасности. Ядром является модифицированный метод почти периодического анализа, адаптированный для обработки графических данных. Применение метода обеспечивает выявление ритмичных пространственных интервалов – почти периодов, интерпретируемых как структурные инварианты снежного покрова.

Для применения формального аппарата почти периодического анализа к произвольным изображениям горных склонов разработан алгоритм симметричной полигональной трансформации. Данный метод основан на аппроксимации исследуемой области цепочкой сопряжённых четырёхугольных полигонов, что обеспечивает топологическую гибкость и согласование с реальной геометрией склона. Реализованная процедура линеаризации включает построение согласованной дискретной сетки, обратное проецирование её узлов на исходное изображение и билинейную интерполяцию яркости, в результате чего формируется двумерная матрица данных, строки и столбцы которой представляют одномерные профили яркости, привязанные к направлениям вдоль и поперёк склона.

Для устранения влияния затенений – характерного артефакта горных снимков – разработаны и сравнительно оценены три алгоритма статистической предобработки: адаптивная гамма-коррекция, стандартизация разнородных частей изображения и выравнивание статистических моментов.

Описаны принципы визуализации выявленных почти периодов в виде структурной сегментации на исходных изображениях, что формирует основу для оценки лавинной опасности.

ГЛАВА 3 . КРИТЕРИИ И МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ

3.1 Характеристики почти периодического анализа в решении задач исследования визуальных данных спутниковых снимков снежного покрова

Применение почти периодического анализа к пространственно-временным данным мониторинга лавинной опасности, представленным растровыми изображениями снежного покрова, позволяет выделять пространственные интервалы единообразного поведения визуальных данных. В данном разделе приведены результаты исследования зафиксированных свойств почти периодического анализа в задачах исследования графических данных снежного покрова.

При применении почти периодического анализа к линеаризованной структуре данных исследуются характерные интервалы единообразного поведения значений. Так как линеаризованная структура представлена двумерной структурой, состоящей из наборов строк и столбцов, возникает возможность исследования различных строк и столбцов, ввиду чего возникает вопрос о согласованности результатов анализа.

Исследование проводится на графическом изображении лавины (Рисунок 3.1), сошедшей 11 января 2025 года в Альпах на хребте между французской коммуной Ларш (Larche) и итальянским населенным пунктом Саретто (Saretto) в коммуне Аччельо (Acceglio).



Рисунок 3.1 – Графическое представление исследуемой лавины

Для проведения почти периодического анализа в структуре лавины 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 (Рисунок 3.2).

Внутри полигонов с заданными частотами определяются сетки узлов дискретизации преобразованных данных. Для линейризации выбраны частоты продольной и поперечной дискретизации – 600 и 300 узлов дискретизации (у.д.) соответственно. Линейризованный набор данных представлен на Рисунке 3.3.

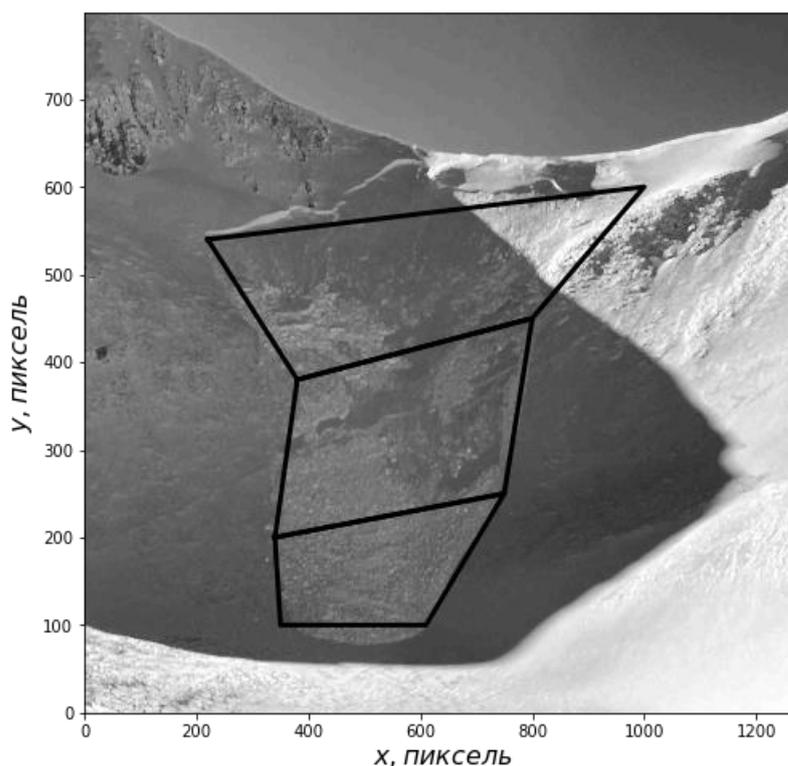


Рисунок 3.2 – Разметка цепочки аппроксимирующих полигонов

Приведённые данные представлены в виде набора горизонтальных и вертикальных структур – последовательностей упорядоченных по аргументу значений яркости узла дискретизации. Почти периодический анализ позволит

определить существование и синхронизацию систем ритмичных тактов в срезах, что позволит провести структурную сегментацию линейризованного набора и воспроизвести разметку существенных границ в теле исследуемой лавины.

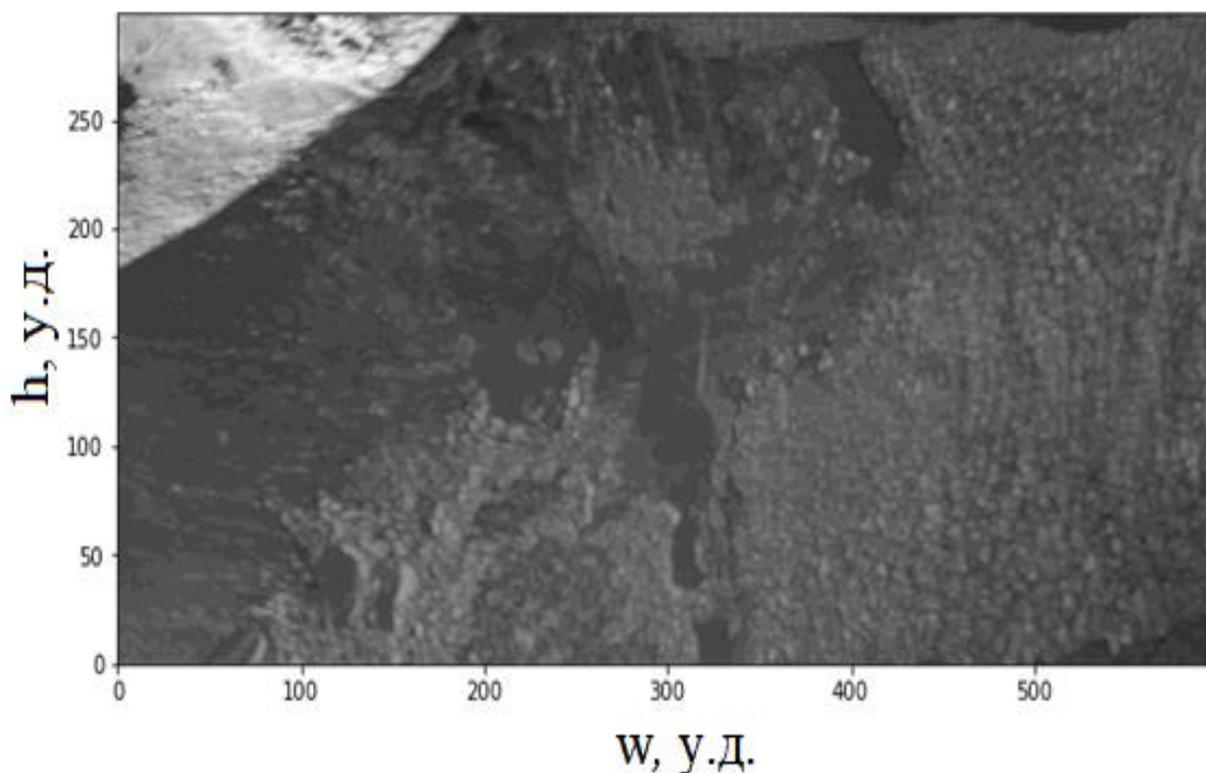


Рисунок 3.3 – Линейризованная структура лавины

Почти периодический анализ определяет значения, близкие по определению к периоду функции, на основе ОСФ – 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 линейризации ($w=300$ у.д.) приводит к исследованию локальных минимумов сечения ОСФ, приведенному на Рисунке 3.4.

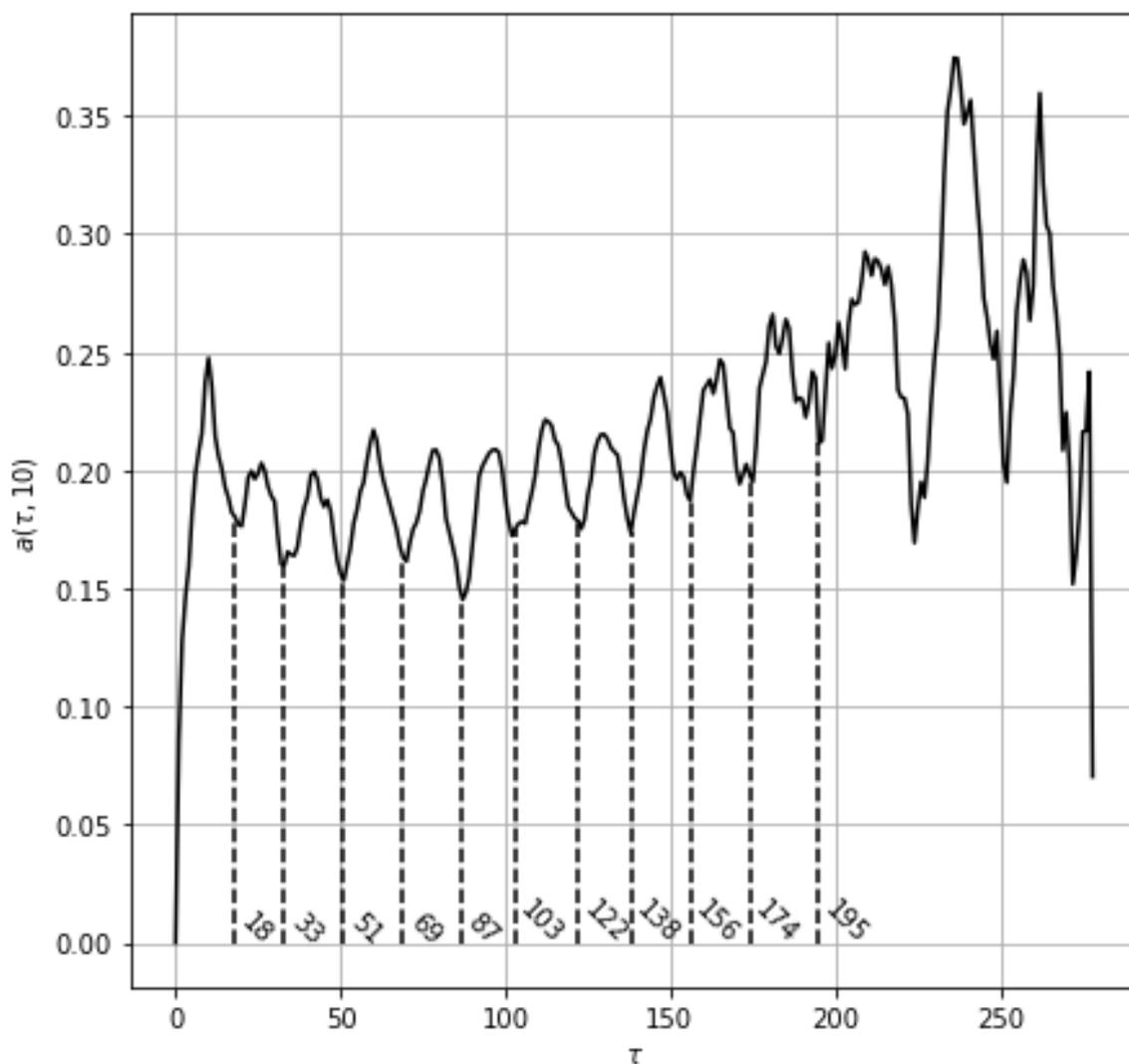


Рисунок 3.4 – Срез ОСФ срединного столбца ($w=300$ уд.) линейризованной структуры с разметкой системы локальных минимумов

Установлено, что система локальных минимумов Рисунка 3.4 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 ОСФ во всей системе локальных минимумов, определённых в первых трёх четвертях среза.

Для первичной систематизации проведен почти периодический анализ для поперечного сечения линейризованных данных в 400-ом столбце. Срез ОСФ с разметкой локальных минимумов приводится на Рисунке 3.5.

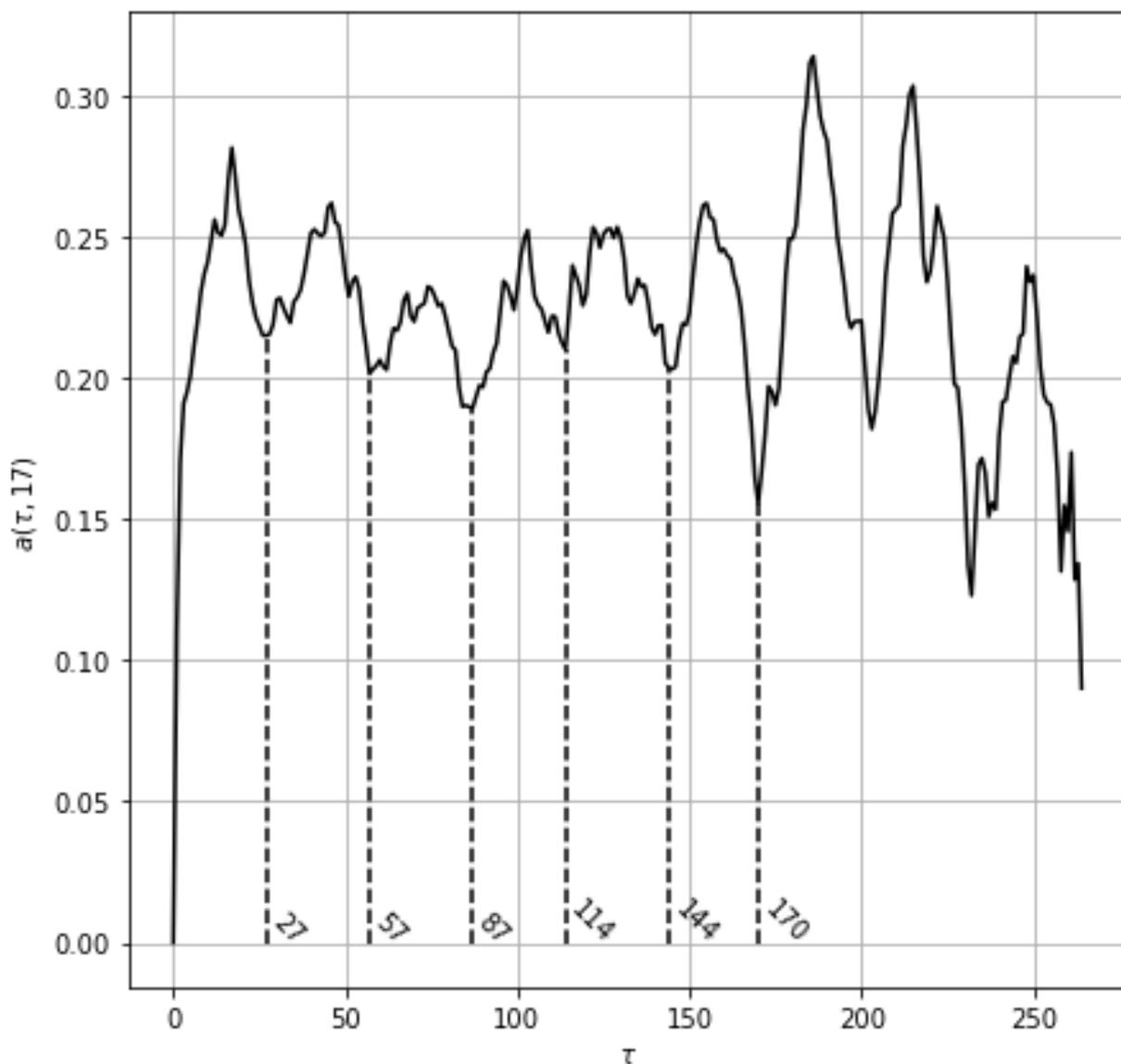


Рисунок 3.5 – Срез ОСФ произвольного столбца ($w=400$ у.д.) линеаризованной структуры с разметкой системы локальных минимумов

Система почти периодов на Рисунке 3.5 так же носит ритмичный характер алгебраической последовательности с шагом, близким к 30 узлам дискретизации. Отдельно необходимо отметить то, что почти период в 87 у.д. повторяется в системах локальных минимумов, что существенно выделяет его и наделяет системным характером.

Чистое воспроизведение почти периода в 87 узлов дискретизации зафиксировано так же в системе локальных минимумов для 250-го столбца линеаризованных данных (Рисунок 3.6).

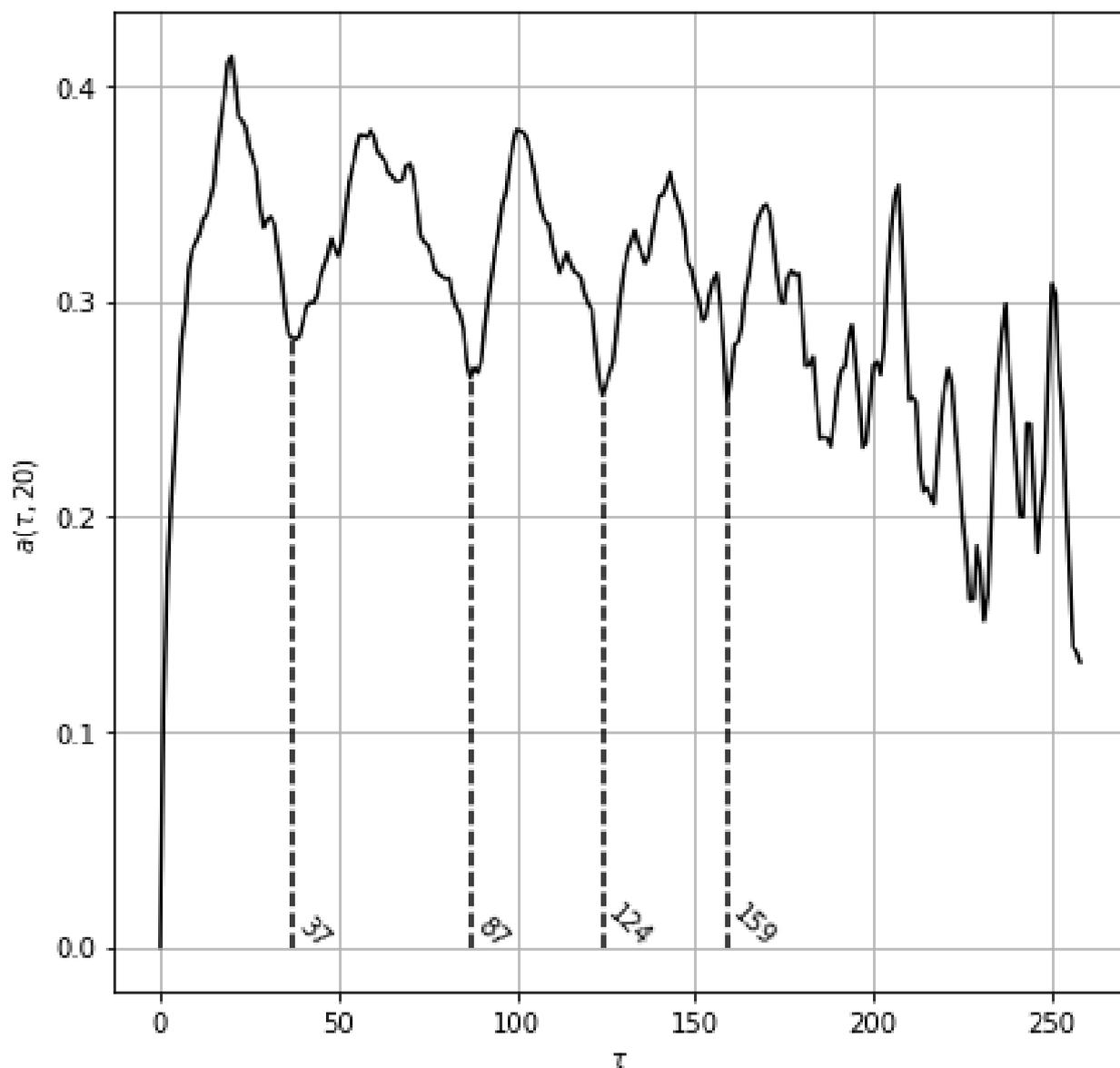


Рисунок 3.6 – Срез ОСФ произвольного столбца ($w=250$ у.д.) линеаризованной структуры с разметкой системы локальных минимумов

Проведение почти периодического анализа в системе первого десятка вертикальных срезов, демонстрирует единообразное поведение срезов.

Рисунок 3.7 убедительно демонстрирует существование пары фундаментальных почти периодов в 40 и 87 у.д. Наблюдали подобие локального минимума в окрестностях 185 у.д. и существенного локального минимума при 250 у.д., однако слабая обеспеченность данными позволяет пренебрегать последней четвертью среза.

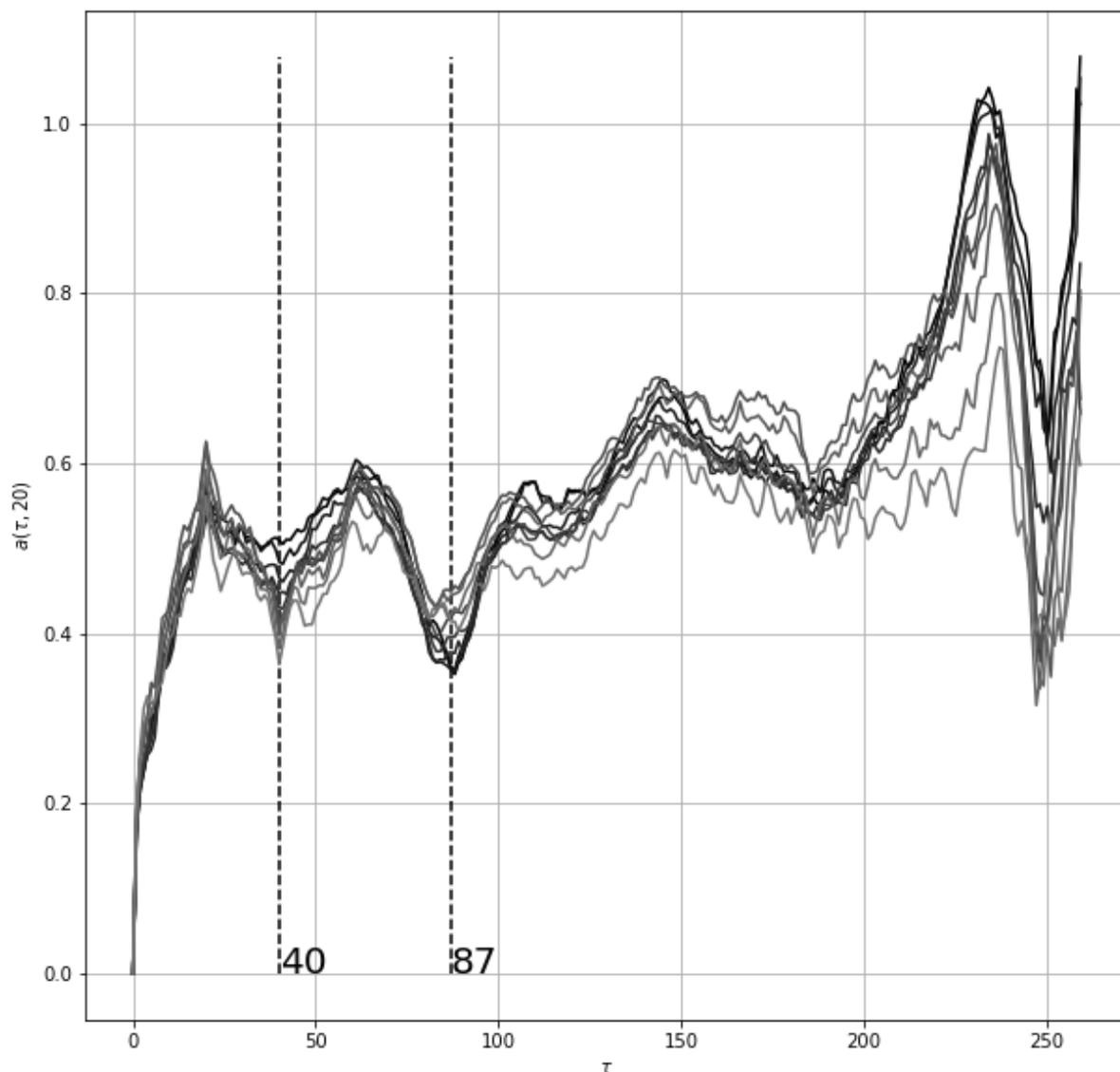


Рисунок 3.7 – Система срезов ОСФ набора столбцов ($w=1,2,3\dots 10$ у.д.) линеаризованной структуры с разметкой системы локальных минимумов

Таким образом, в структуре почти периодов поперечных сечений линеаризованных данных тактовый интервал в 87 у.д. демонстрирует систематический характер, определяя фундаментальный статус пространственного такта исследуемого явления.

Проведение почти периодического анализа в системе горизонтальных сечений линеаризованных данных Рисунка 3.3 позволяет оценить продольные почти периоды в структуре. Так, для срединного продольного сечения срез ОСФ приводится на Рисунке 3.8.

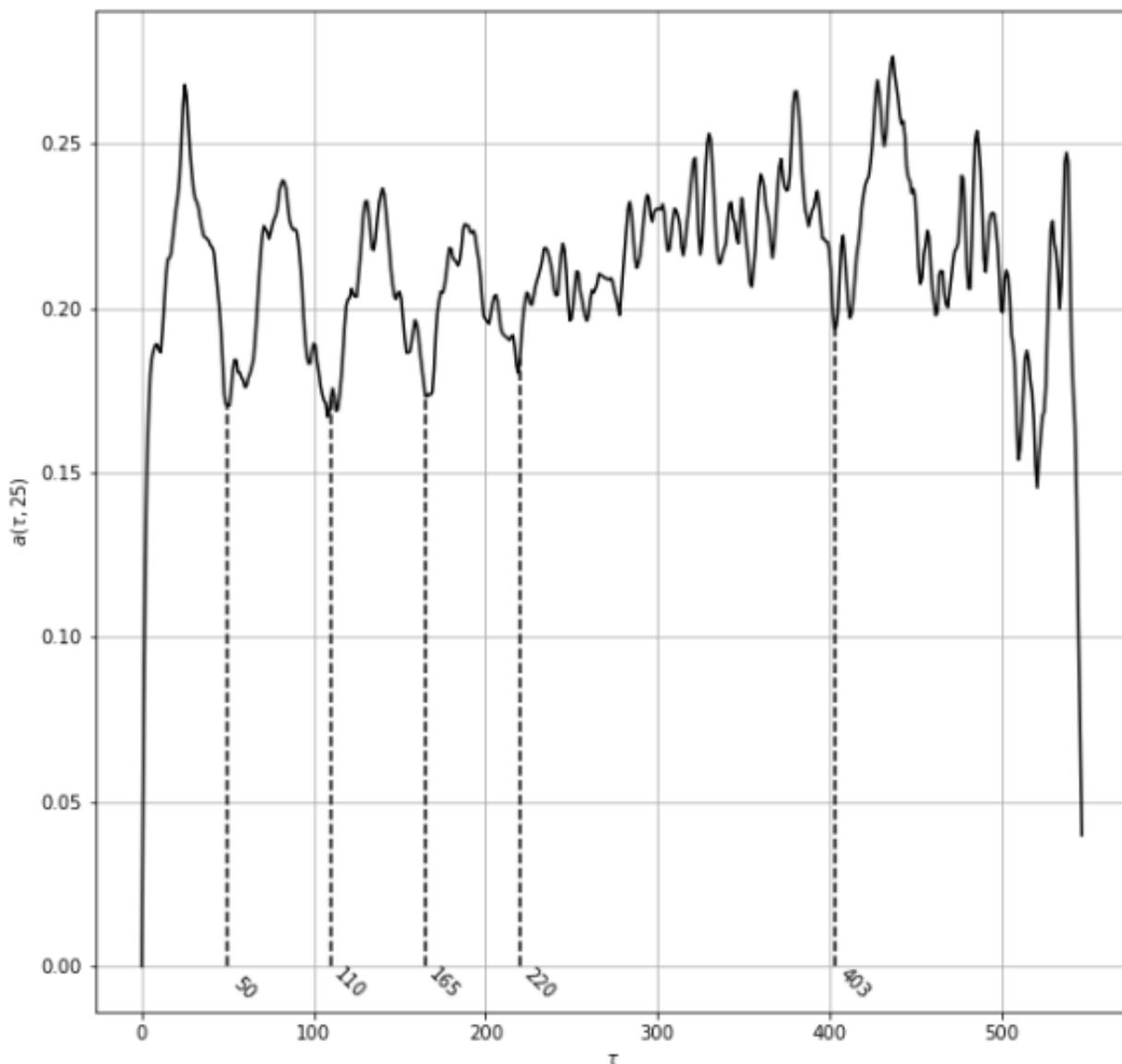


Рисунок 3.8 – Сечение ОСФ для срединного горизонтального среза ($h=150$ уд.) линеаризованных данных с разметкой системы локальных минимумов

Установлено, что система локальных минимумов на Рисунке 3.8 представляет практически идеальную алгебраическую последовательность, что так же указывает на их фундаментальный характер.

Рисунок 3.8 демонстрирует, что существенные локальные минимумы так же, как на Рисунках 3.4 и 3.5 образуют последовательность, схожую с арифметической прогрессией. Помимо существенных локальных минимумов заметна система ритмичных высокочастотных оврагов, указывающая на неявный фундаментальный малый почти период примерно в 12 узлов

дискретизации, однако относительная глубина соответствующего прогиба невелика.

Результаты почти периодического анализа по отношению к произвольной ($h = 50$ у.д.) строке представлены на Рисунке 3.9.

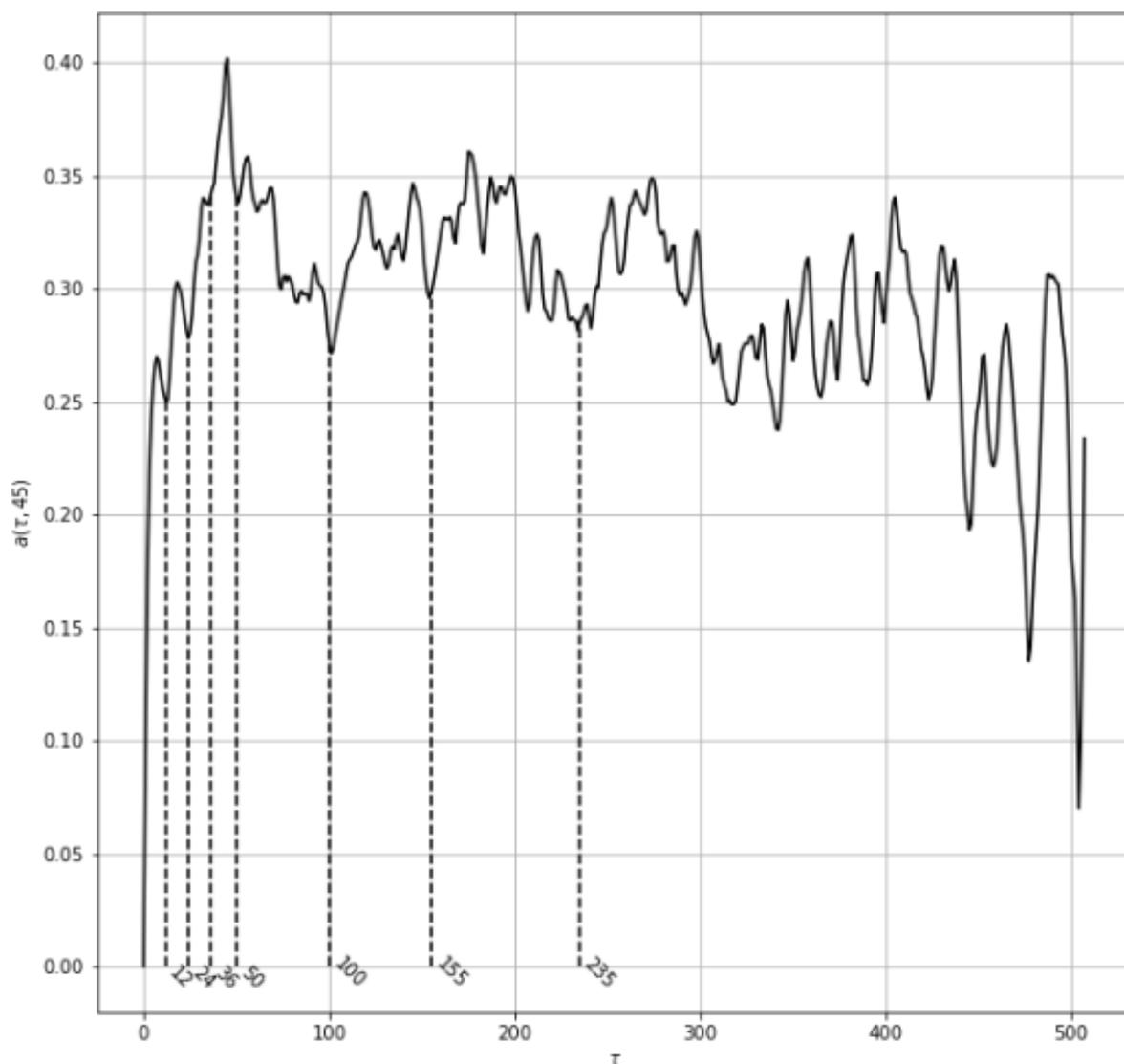


Рисунок 3.9 – Сечение ОСФ для произвольной строки ($h=50$ у.д.) линейризованных данных с разметкой системы локальных минимумов

Рисунок 3.9 демонстрирует, что явление почти периода в 12 узлов дискретизации носит более явный характер – его можно увидеть в основе алгебраической последовательности локальных минимумов в 12, 24, 36 и 50 (близко к 48) узлах дискретизации. Существенные локальные минимумы установлены в 100, 155 и 235 узлах дискретизации.

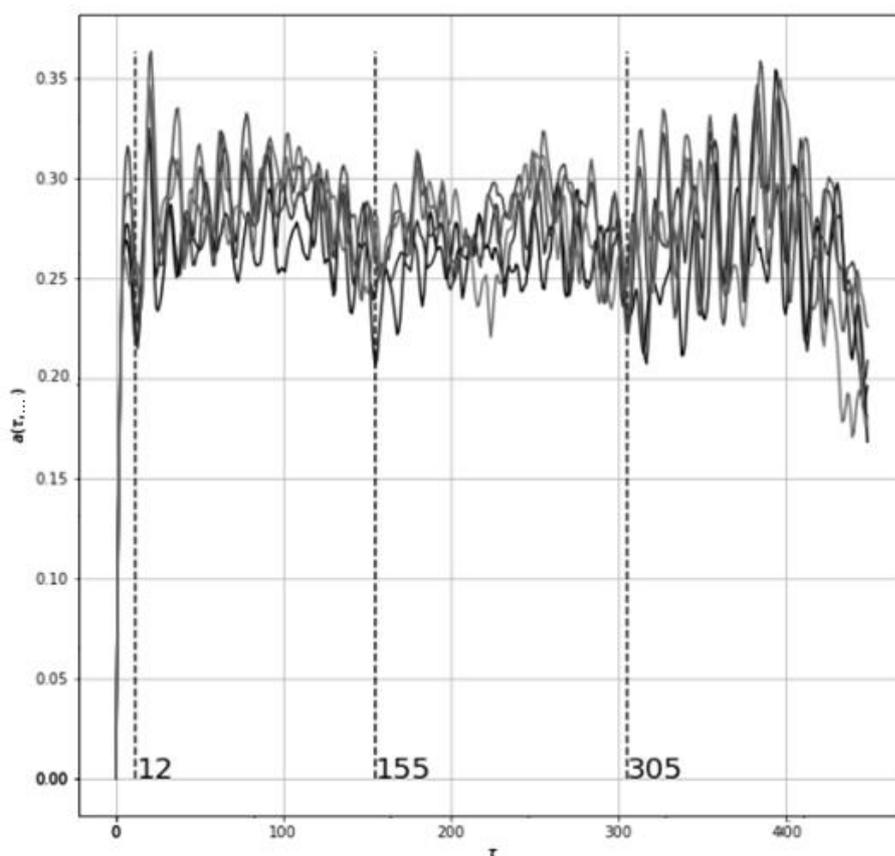


Рисунок 3.10 – Сечение ОСФ для системы строк ($h=10,20,30,40$ у.д.) линеаризованных данных с разметкой системы локальных минимумов

Рисунок 3.10 показывает обилие локальных минимумов, образующих почти строгие алгебраические последовательности с фундаментальным почти периодом в 12 узлов дискретизации. Выделены 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. На основе авторского алгоритма приводится система визуализаций структурной сегментации, основанной на определённых регулярных почти периодах. Для демонстрации рассматриваются композиции продольных почти периодов в 155 и 305 узлов дискретизации и поперечных почти периодов в 40 и 87 узлов дискретизации, согласно локальным минимумам, представленным на Рисунках 3.7 и 3.10.

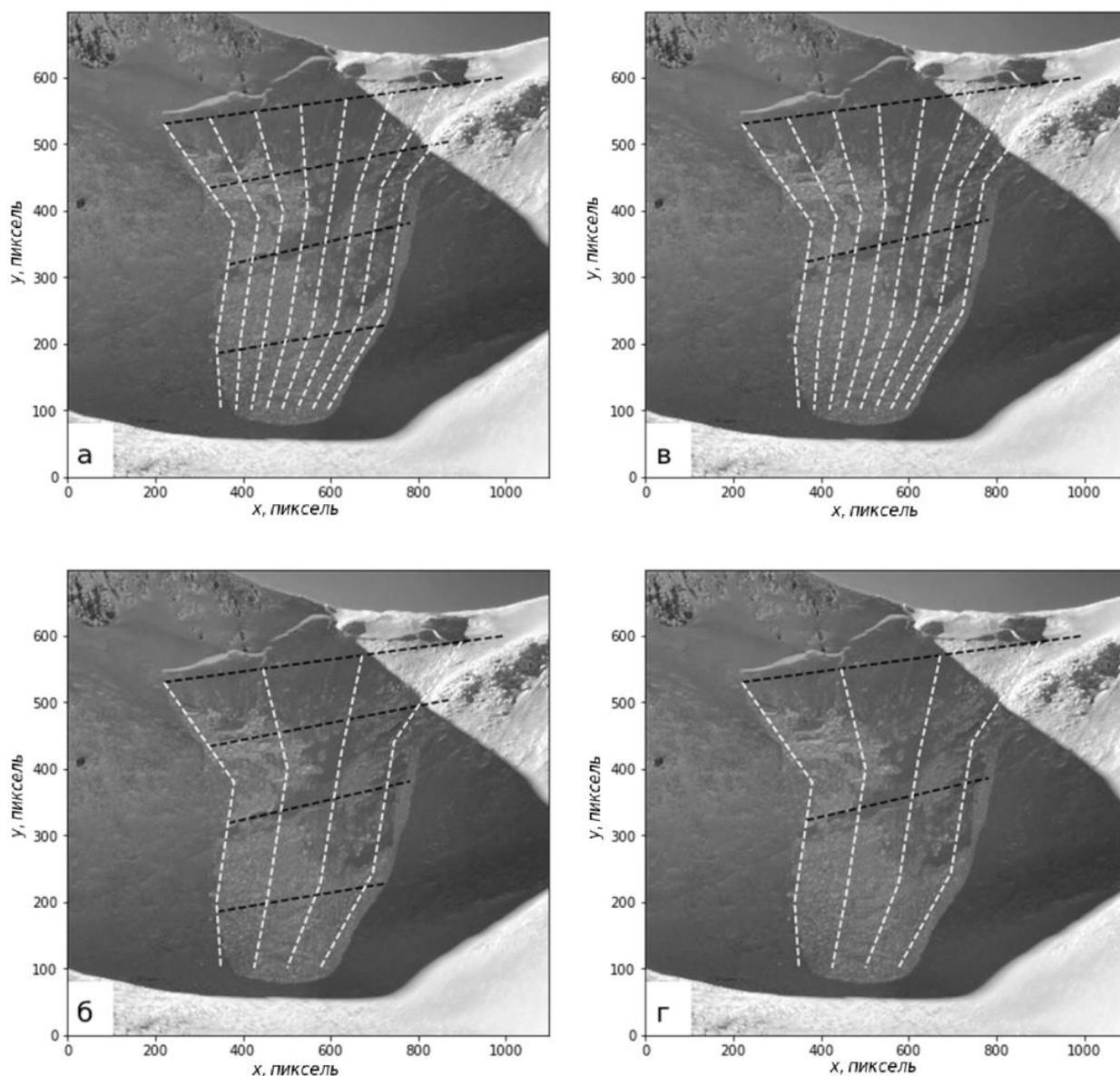


Рисунок 3.11 – Комбинации композиций продольных и поперечных почти периодов на исходных данных

Ритмичные границы приведённой сетки на исходных данных воспроизведены в пространстве исходных данных (Рисунок 3.11) – белые линии определяют поперечные почти периоды, а чёрные – продольные почти периоды соответственно.

Рисунок 3.11 представляет композиции, сохраняющие почти периоды в строках и столбцах графиков: в строках сохраняется величина поперечного почти периода – так, Рисунок 3.11 (а) и Рисунок 3.11 (в) имеют ширину белой сетки в 40 узлов дискретизации, а Рисунок 3.11 (б) и Рисунок 3.11 (г) –

ширину белой сетки в 87 узлов дискретизации. Для ширины продольных почти периодов это правило сохранено внутри столбцов – Рисунок 3.11 (а) и Рисунок 3.11 (б) размечены чёрными границами с шагом в 155 узлов дискретизации, а Рисунок 3.11 (в) и Рисунок 3.11 (г) – 305 узлов дискретизации соответственно.

Рисунок 3.11(б) демонстрирует удачную композицию почти периодов, формирующих структуризацию – отдельные области разграничиваются практически по идеальным цветовым сегментам – области отложения лавины практически строго отсекаются и по продольным, и по поперечным границам приведённой сегментации.

Рисунок 3.11(б) и Рисунок 3.11 (г) показывают, 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.

Таким образом, в структуре исследуемого явления определены существенные почти периоды, обуславливающие фундаментальные такты развития системы – результаты представлены во всех обозримых ОСФ, определённых в различных положениях линеаризованной структуры. Для проведения верификации и визуализации существенных почти периодов приводится алгоритм на Рисунке 3.12.

Таким образом, почти периодический анализ продемонстрировал системный характер результатов. Это наблюдение показывает возможности упрощения проведения анализа на основе обобщения результатов нескольких наблюдаемых почти периодов и экстраполяции на оставшуюся структуру, не вызывая необходимости анализа всех строк и столбцов линеаризованных данных [77].

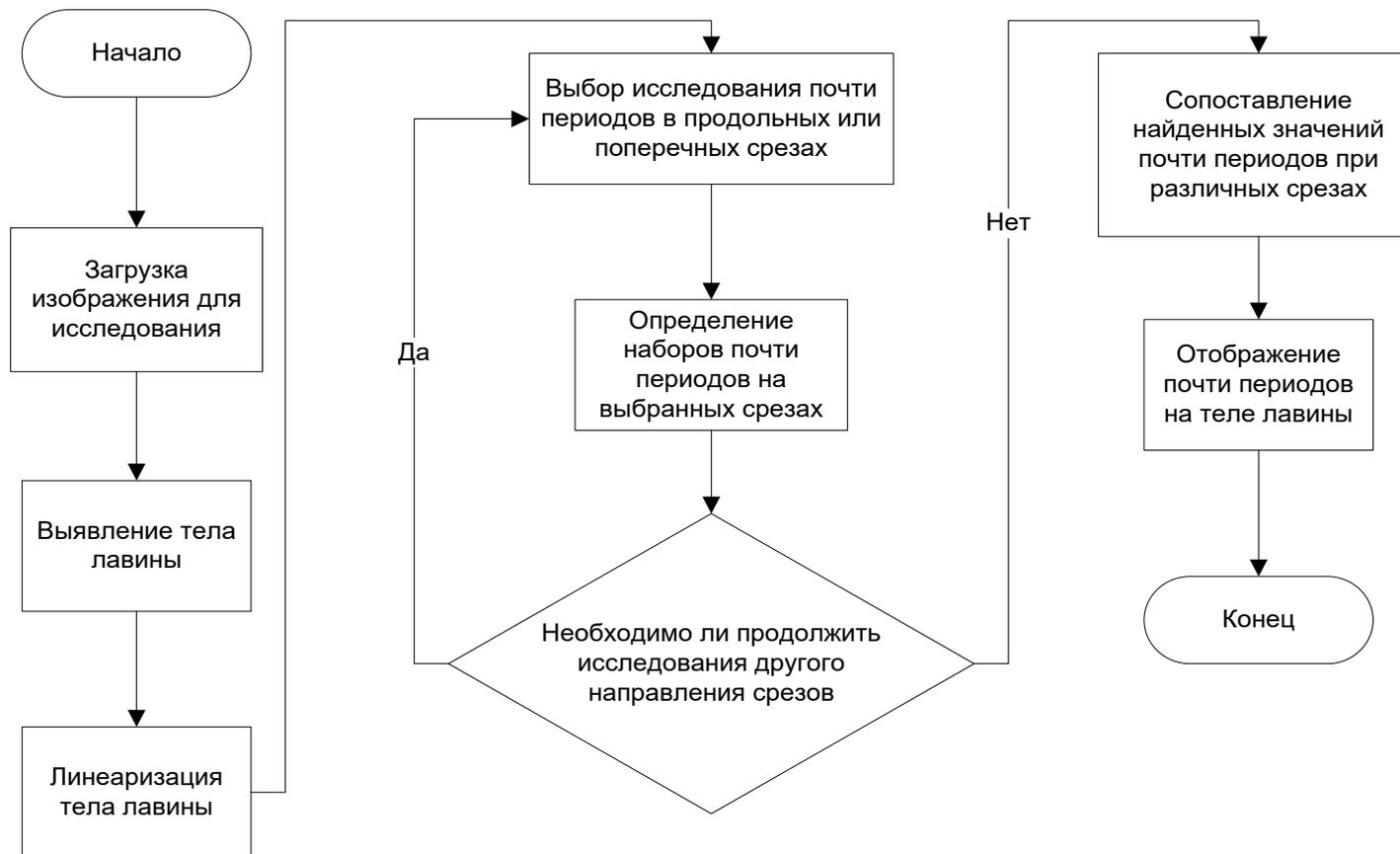


Рисунок 3.12 – Схема алгоритма анализа информации о регулярном характере структуры снежной лавины на основе выявленных почти периодов

Актуальность задачи предобработки спутниковых изображений лавиноопасных регионов связана с наличием на них значительных теневых артефактов, возникающих из-за рельефа местности и условий освещенности. Данные артефакты могут исказить спектральные характеристики и маскировать важные для анализа структурные особенности, что негативно сказывается на точности последующих методов классификации и детектирования. В связи с этим представляет научный и практический интерес оценка устойчивости продвинутых методов анализа, таких как почти периодический анализ, к вариациям яркости, вызванным указанными артефактами.

Алгоритмы статистической преобработки данных, рассматриваемые для нивелирования теневых артефактов, описаны в главе 2 диссертации – это гамма-коррекция, стандартизация и выравнивание моментов. Применение почти периодического анализа по отношению к контрольным серединным строкам линейризованных структур (Рисунок 2.23 (а),(в),(д),(ж)) позволяет оценить влияние на положения локальных минимумов ОСФ.

Так, срез ОСФ для средней строки ($h = 50$ у.д.) необработанных данных рисунка 2.23(а) приведен на Рисунке 3.13.

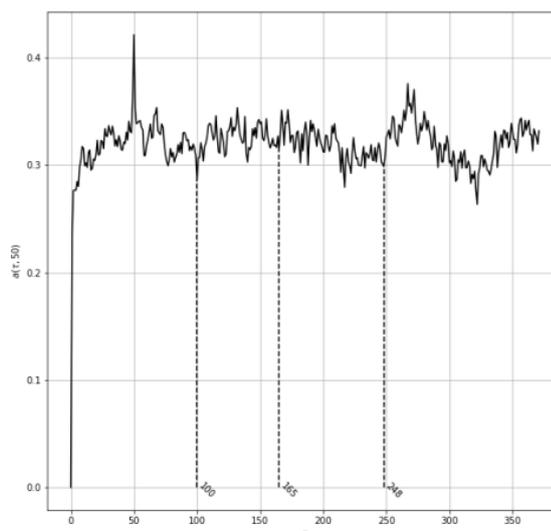


Рисунок 3.13 – Срез ОСФ для средней строки ($h = 50$ у.д.) необработанных данных (Рисунок 2.23(а)) с разметкой локальных минимумов

Существенные локальные минимумы выделяются в значениях 100, 165 и 248 у.д. Так же заметен локальный минимум вблизи 220 у.д. и в 325 у.д.

Применение гамма-коррекции нивелирует расхождение средних значений области теневого артефакта. При этом разнородность дисперсии в данных сохраняется – в области теневого артефакта данные имеют меньший относительный разброс. Обработка соответствующей строки предобработанных данных на основе почти периодического анализа показывает идентичные результаты (Рисунок 3.14)

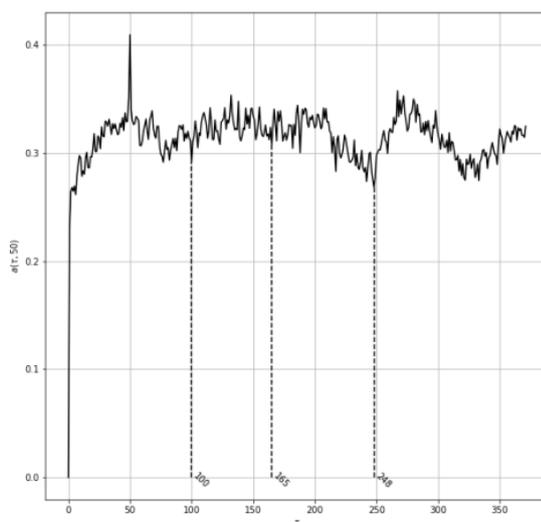


Рисунок 3.14 – Срез ОСФ для средней строки ($h = 50$ у.д.) данных, предобработанных алгоритмом гамма-коррекции (Рисунок 2.23(в)), с разметкой локальных минимумов

Существенные локальные минимумы так же представлены в значениях 100, 165 и 248 у.д.. Локальный минимум в 325 узлах дискретизации притерпел разворот, и утратил существенность.

Предобработка на основе стандартизации привела к отрицательным значениям данных, что сказалось на применимости выражения (2.11) ввиду возникновения отрицательного аргумента в операции логарифма. Поэтому данные были дополнительно дополнены минимальным значением – таким образом, в выражении (2.11) применялся оператор модуля в аргументе логарифмирования.

Применение почти периодического анализа к контрольной строке ($h=50$ у.д.) линейризованной структуры данных, прошедшей предобработку по выражению (2.13), продемонстрировало идентичность результатов – положений локальных минимумов ОСФ.

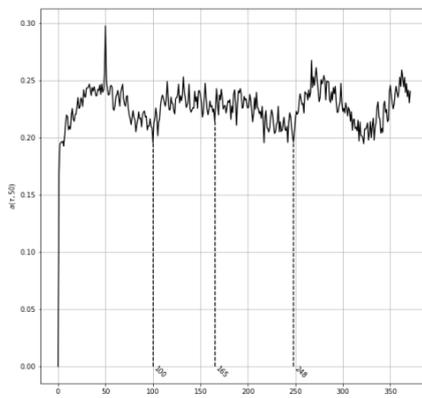


Рисунок 3.15 – Срез ОСФ для средней строки ($h = 50$ у.д.) данных, предобработанных алгоритмом стандартизации (Рисунок 2.23(д)), с разметкой локальных минимумов

Заключительный метод статистической предобработки – метод выравнивания моментов – привёл данные к единому масштабу средних и дисперсий, причём отрицательных значений яркости в данных уже не наблюдалось. Применение почти периодического анализа к контрольной строке ($h = 50$ у.д.) так же, как и в других случаях (Рисунки 3.13, 3.14, 3.15) показало устойчивость положений локальных минимумов ОСФ (Рисунок 3.16).

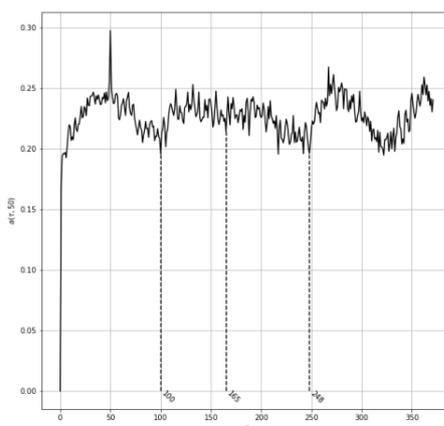


Рисунок 3.16 – Срез ОСФ для средней строки ($h = 50$ у.д.) данных, предобработанных алгоритмом выравнивания моментов (Рисунок 2.23(ж)), с разметкой локальных минимумов

Таким образом, исследование установило инвариантность результатов почти периодического анализа по отношению к применяемым методам простой статистической фильтрации, что позволяет снизить требования к анализируемым данным и игнорировать наличие теневых артефактов на изображении.

3.2 Почти периодический анализ как инструмент прогнозирования лавинной опасности.

Проведение почти периодического анализа предполагает обработку значений функции с упорядоченным аргументом, которыми в данном случае становятся значения внутри единых строк или столбцов матрицы линеаризованных 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.

Результатом почти периодического анализа становятся интервалы единообразного поведения функции в строках и столбцах матрицы, разделенные равномерно отдалёнными границами, формирующими прямоугольную сетку в пространстве линеаризованных данных. Воспроизведение сетки единообразия на исходных данных позволяет установить потенциально лавиноопасные зоны хребта для принятия мер по противодействию опасному природному явлению.

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 [88].

Исходными данными является графическое изображение тибетского хребта, расположенного близ озера Ару-Цо, в чёрно-белой гамме [87]. Изображение приводится на Рисунке 3.17.

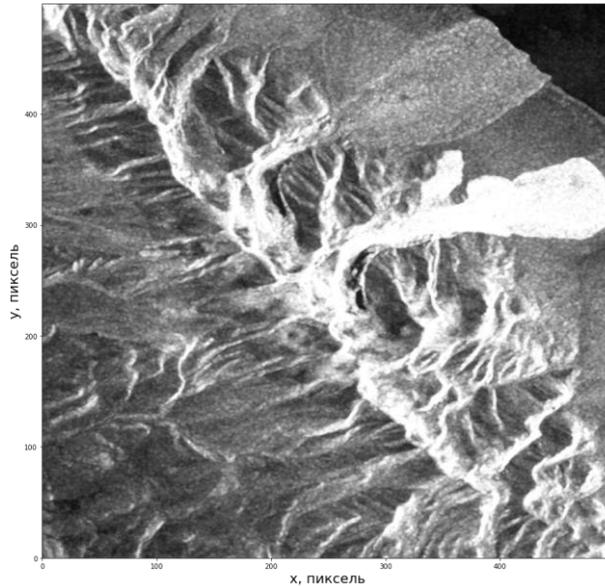


Рисунок 3.17– Изображение исследуемого хребта

Для формирования линейризованных данных на изображение накладывается цепочка полигонов, приведенная на Рисунке 3.18.

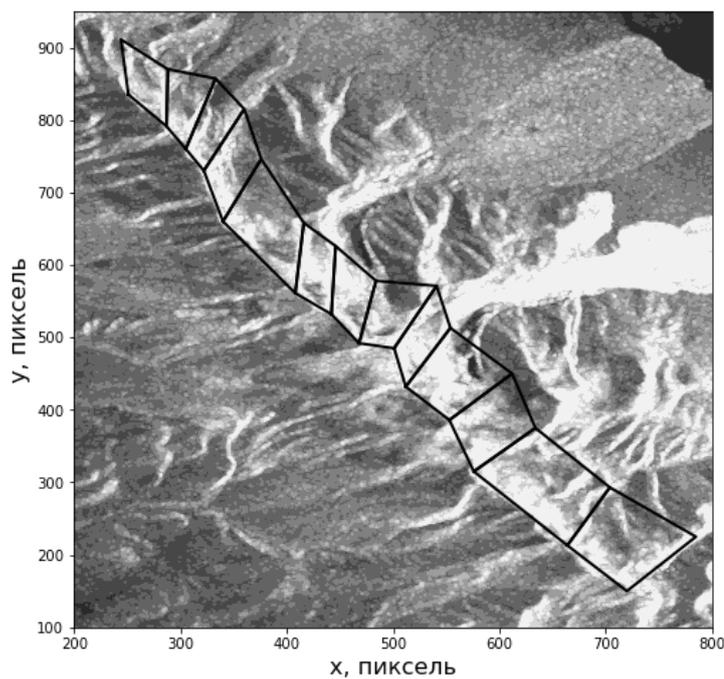


Рисунок 3.18 – Разметка линейризующей цепи полигонов

В системе полигонов поперечная частота дискретизации составляет 100 узлов, а продольная является последовательной композицией значений из 42, 26, 30, 49, 73, 30, 37, 58, 101, 83 и 65 узлов дискретизации, рассчитанных из учёта отношения длины срединного сечения продольной части полигона к общей длине срединного сечения цепочки, для каждого соответствующего

полигона так, чтобы суммарная длина составляла 593 узла дискретизации. Графическое представление линеаризованных данных с пунктирной разметкой границ полигонов приводится на Рисунке 3.19.

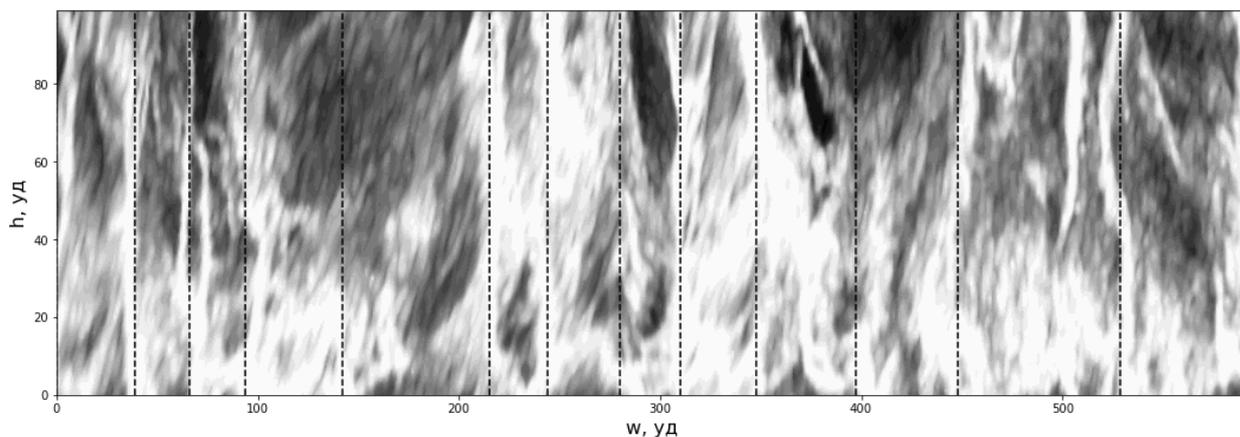


Рисунок 3.19 – Графическое представление линеаризованных данных с разметкой границ полигонов

Проведение почти периодического анализа по отношению к продольному сечению линеаризованных данных основано на определении значений аргумента почти периода обобщенной сдвиговой функции, в которых она достигает локальных минимумов. Так, система локальных минимумов на Рисунке 3.20 демонстрирует существование ритмичных характеристик в структуре хребта.

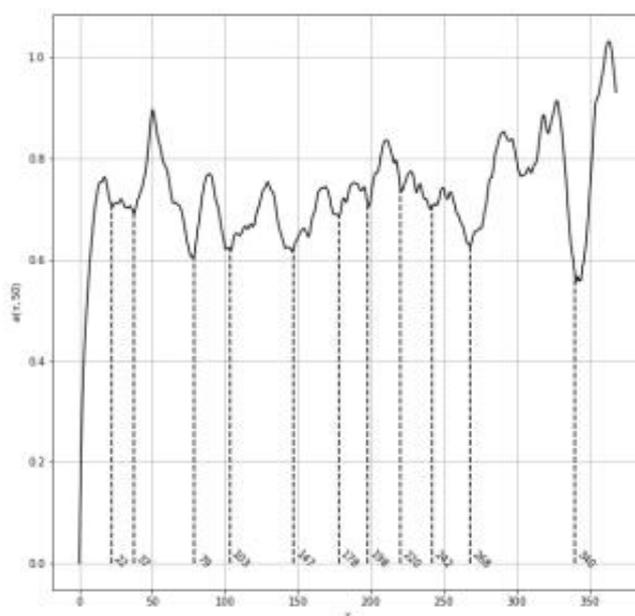


Рисунок 3.20 – Срез обобщенной сдвиговой функции продольного сечения линеаризованных данных с разметкой локальных минимумов

В структуре локальных минимумов наблюдается зависимость, близкая по характеру к арифметической прогрессии – так, последовательность значений 178, 198, 220, 242 и 268 разделяется значением 22 с относительной погрешностью менее 10 %. Так же следует отметить, что значение почти периода в 220 узлов дискретизации является десятикратным увеличением значения 22 узла дискретизации и существенно близким к шестикратному увеличению значения 37 узлов дискретизации. Так же значение почти периода в 147 узлов дискретизации является близким к четырехкратному увеличению значения почти периода в 37 узлов – всё вышеописанное указывает на фундаментальный характер почти периодов в 22 и 37 узлов дискретизации.

Структурная сегментация изображения, основанная на почти периодах в 22 узла дискретизации, приводится на Рисунке 3.21.

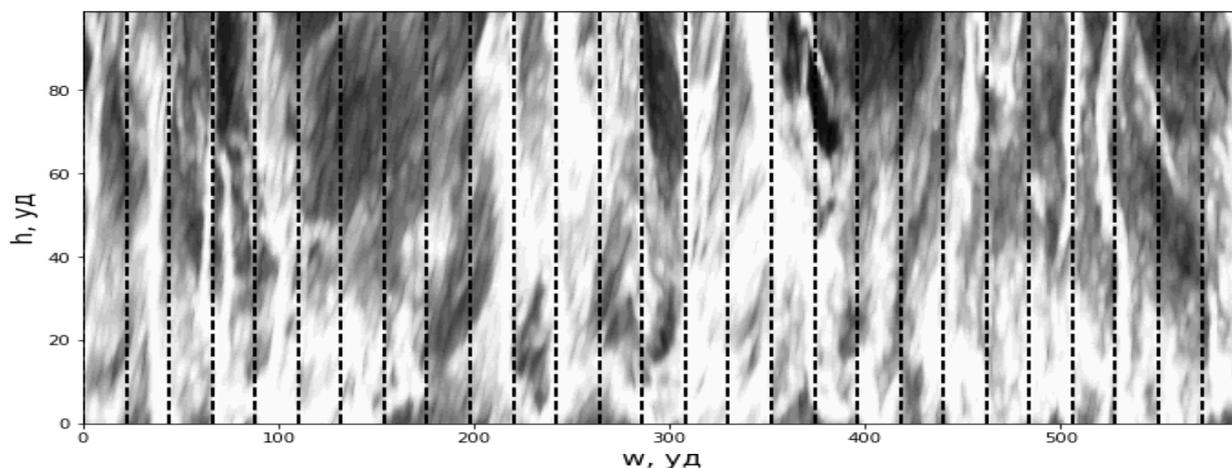


Рисунок 3.21 – Разметка продольного почти периода в 22 узла дискретизации на линеаризованных данных

Рисунок 3.21 показывает, что большинство каналов расположения снежных масс размещаются внутри интервалов по 22 узла дискретизации, однако некоторые скопления занимают по несколько равномерных интервалов.

Для поперечного сечения линеаризованных данных система локальных минимумов обобщённой сдвиговой функции приводится на Рисунке 3.22.

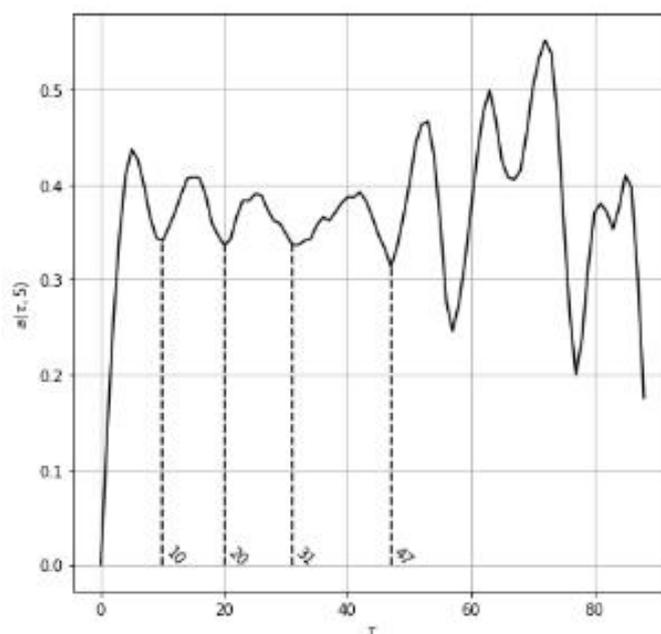


Рисунок 3.22 – Срез обобщенной сдвиговой функции поперечного сечения линейризованных данных с разметкой локальных минимумов

Рисунок 3.22 так же, как и Рисунок 3.20, демонстрирует арифметическую прогрессию значений почти периодов – таким образом, почти период в 10 узлов дискретизации является фундаментальным для поперечной дискретизации. Однако ввиду большого количества тактов почти периода в общей системе для поперечных почти периодов больший интерес представляют почти периоды, уместяющиеся в системе в количестве, не превышающем половины десятка. Пример сегментации приведен на Рисунке 3.23.

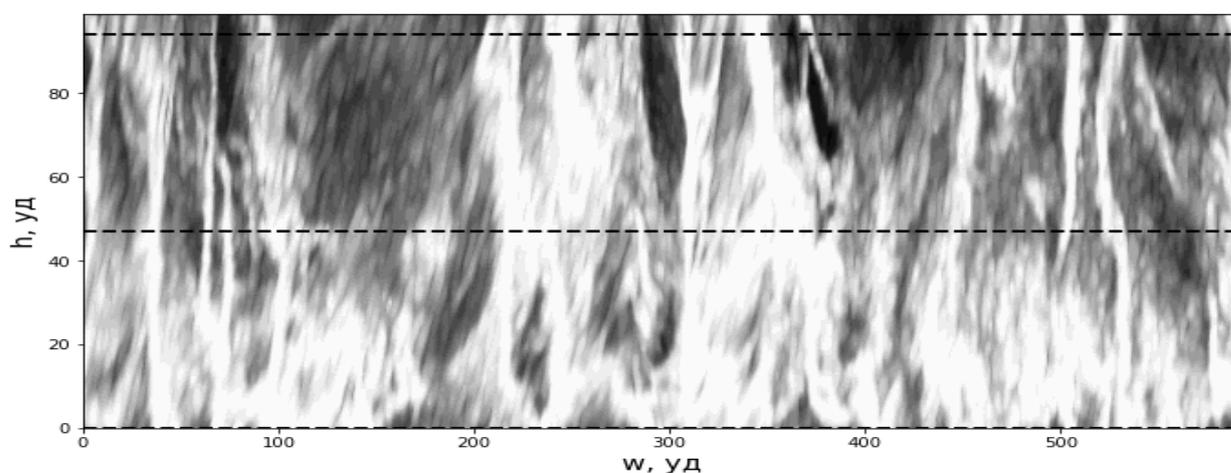


Рисунок 3.23 – Разметка поперечного почти периода в 47 узлов дискретизации на линейризованных данных

Таким образом, на основе зафиксированных почти периодов возникает возможность разметить в пространстве ритмичные критические границы. Примером композиции поперечного почти периода в 47 узлов дискретизации, и продольного почти периода, величиной 22 узла дискретизации приводится на Рисунке 3.24.

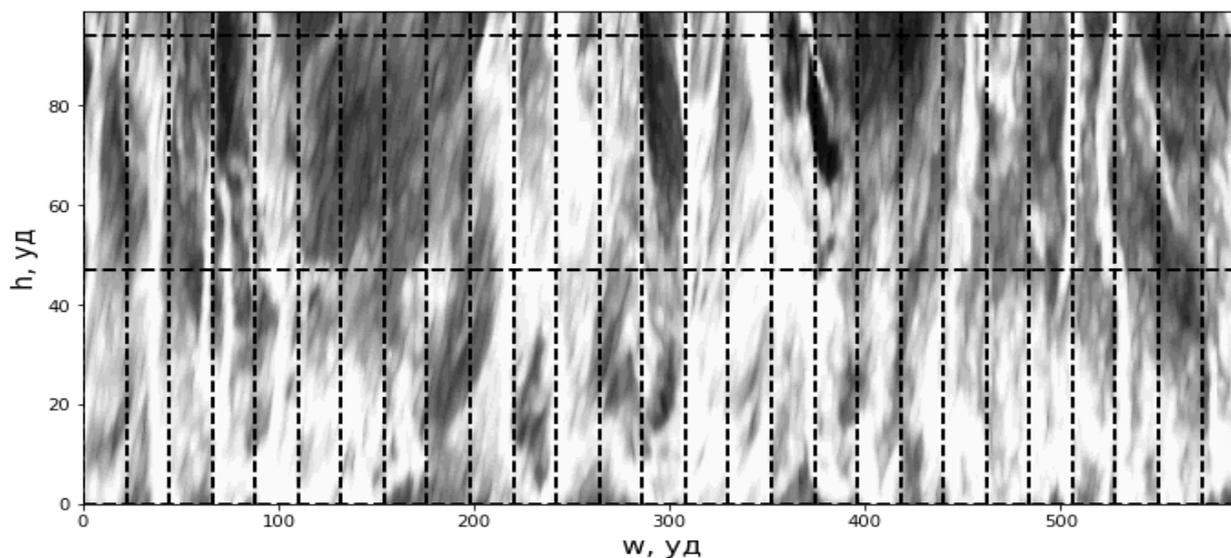


Рисунок 3.24 – Разметка ритмичных границ структурной сегментации, основанной на почти периодах в 22 продольных и 47 поперечных узлов дискретизации

Рисунок 3.24 демонстрирует, что продольные границы ритмичной сетки поперечных почти периодов выделяют в исследуемой области область, покрытую снегом, от области открытого скального хребта. Поперечные границы продольных почти периодов регулярно отсекают каналы схода лавин – иногда канал формируется единичным интервалом, а иногда – парой интервалов.

На основе полученных результатов исследования можно сделать вывод о наличии почти периодических структурных элементов в исследуемом горном хребте. Полученные результаты позволят сопоставить структурное разбиение изображения хребта с точками схода снежных лавин. Данная процедура позволит выявить критические рубежные зоны на структуре хребта, являющиеся опасными или потенциально опасными для схода лавин.

В исследуемых данных выявлены поперечный почти период, равный 47 узлам дискретизации и продольный почти период, равный 22 узлам дискретизации аппроксимирующей сетки линейных полигонов. Установлено, что ритмичные такты сечений в линеаризованных данных яркости узлов дискретизации аппроксимирующей сетки спутникового изображения снежного покрова определяют характерные интервалы эквипотенциальных лавиноопасных зон.

Была выдвинута гипотеза о возможности установления качественного пространственного критерия накопления снежной массы K_p , равного поперечному почти периоду, при превышении значений которого происходит сход лавины.

Была выдвинута гипотеза о возможности установления количественного пространственного критерия объёма снежной массы K_v , кратного продольному почти периоду T_p , позволяющего оценить объём сходящей лавины. K_v может быть представлен в шкале узлов дискретизации и в количестве целых выявленных продольных почти периодов T_l .

На основе сформированных критериев K_p и K_v создана классификация степени лавинной опасности, согласованная с европейской шкалой лавинной опасности. Классификация приведена в Таблице 3.1

Таблица 3.1 – Классификация степеней лавинной опасности на основе критериев, полученных с применением почти периодического анализа.

Степень лавинной опасности по европейской шкале	Площадь поперечного накопления снежной массы (узлы дискретизации)	Площадь продольного накопления снежной массы (узлы дискретизации)
Низкая степень (1)	$[0; T_p)$	$[0; T_l)$
Средняя степень (2)	$[T_p; 2T_p]$	$[T_l; +\infty)$
Значительная и выше (3-5)	$(2T_p; +\infty)$	$[T_l; +\infty)$

Разметка степеней лавинной опасности, основанная на приведённой классификации, приводится на Рисунке 3.25.

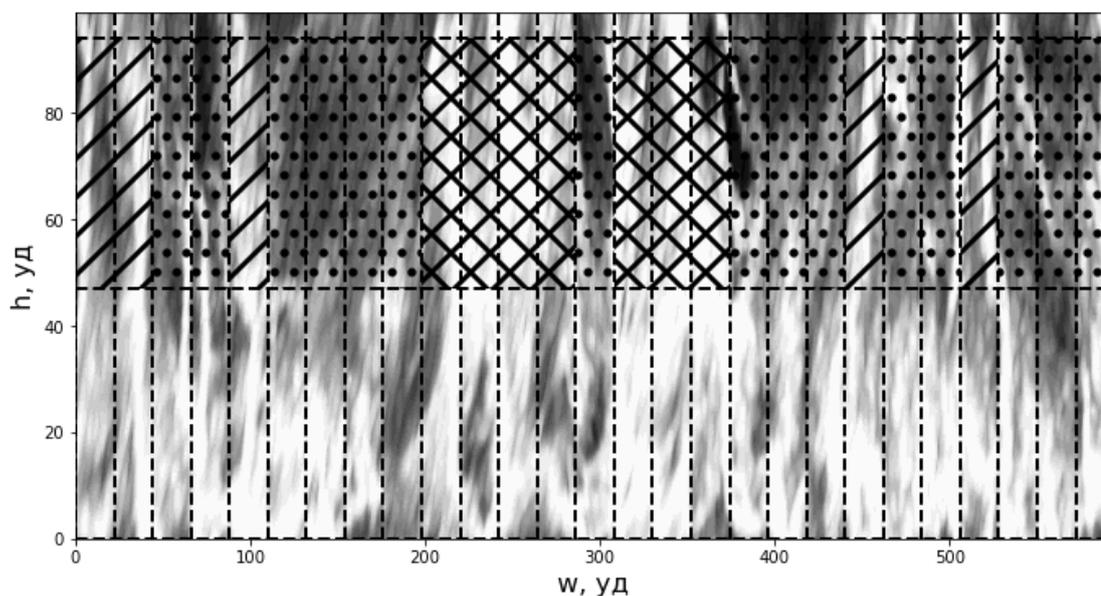


Рисунок 3.25 – разметка выявленных пространственных почти периодов в линейаризованных данных с интерпретацией критериев лавинной опасности (область перекрестной штриховки – $Kv > 2$: сход лавины; область наклонной штриховки – $Kv \leq 2$: незначительный сход снежных масс; область точечной разметки – Kp не превышен, сход не предполагается).

Апробирование полученных результатов проводили на изображениях снежного покрова территории горного хребта северо-западной области Тибетского автономного района. На исследуемой территории сошли две крупных лавины; в данных, характеризующих лавины, установлены значения превышающие величины критериев Kp и Kv . Полученные результаты подтверждают нестабильность снежной массы и возможность схода снежной лавины на данном участке, что хорошо согласуется с данными схода реальной снежной лавины [85, 86].

3.3 Особенности устойчивости моделирования методом гидродинамики сглаженных частиц

В рамках рассматриваемой трехмерной модели [137, 142, 144] снежная масса дискретизируется на совокупность сферических элементов диаметром

d_3 . Взаимодействие между элементами описывается вязкоупругой моделью, где сила воздействия на i -й элемент со стороны j -го элемента определяется как векторная сумма (3.1).

$$F_{ij} = F_{ij}^y + F_{ij}^B, \quad (3.1)$$

где F_{ij}^y – сила упругого взаимодействия, F_{ij}^B – сила вязкого взаимодействия.

Ключевой проблемой при реализации SPH-моделирования лавинных процессов является обеспечение устойчивости начальной конфигурации системы частиц. При размещении частиц в ограниченном объеме, соответствующем лавиноопасному участку склона, возникает эффект плотной упаковки, когда среднее расстояние между центрами частиц становится сравнимым с характерным диаметром элемента.

Сила упругого взаимодействия в выражении (3.2) определяется для частиц i и j по выражению:

$$F_{ij}^y = \begin{cases} c(d_3 - r_{ij}) \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}}, & r_{ij} < \alpha d_3, \\ 0, & r_{ij} \geq \alpha d_3, \end{cases} \quad (3.2)$$

где c – коэффициент жесткости, r_{ij} – расстояние между центрами частиц, α – коэффициент, определяющий границу взаимодействия.

Из формулы (3.2) определяются три основных формата взаимодействия – отсутствие взаимодействия – определенное при существенном удалении частиц друг с другом, притяжение – в случае возникновения взаимодействия без соприкосновения, и отталкивание – возникающее при взаимопроникновении частиц. График зависимости силы упругого взаимодействия от расстояния между центрами частиц приведен на Рисунке 3.26.

При высокой плотности упаковки величина r_{ij} стремится к d_3 , что приводит к резкому росту числа соседей в зоне взаимодействия и, как следствие, к возникновению чрезмерных сил отталкивания. Это проявляется в нефизичном взрывном разлете частиц на начальных шагах моделирования.

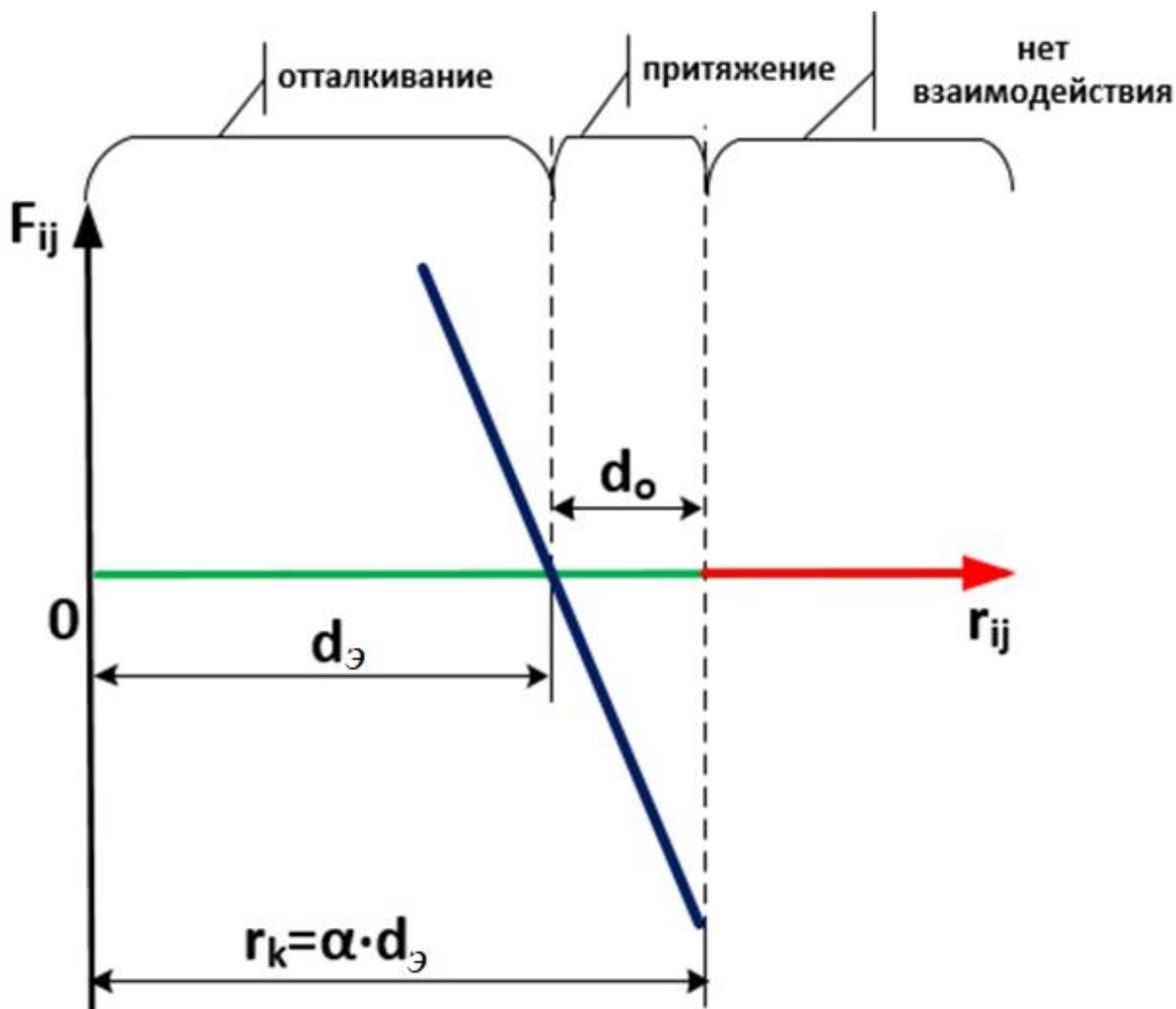


Рисунок 3.26 – График зависимости силы упругого взаимодействия от расстояния между центрами частиц

Для определения начальных координат моделирования применяется подход, основанный на почти периодическом анализе линеаризованной структуры лавиноопасной области. В рамках подхода формируется система полигонов, аппроксимирующих геометрию склона, и определяется система критических линейных границ, определяющих лавиноопасные области исследуемого хребта.

Для моделирования начальных координат частиц определённые границы воспроизводятся в пространстве соответствующих цифровых моделей рельефа (ЦМР).

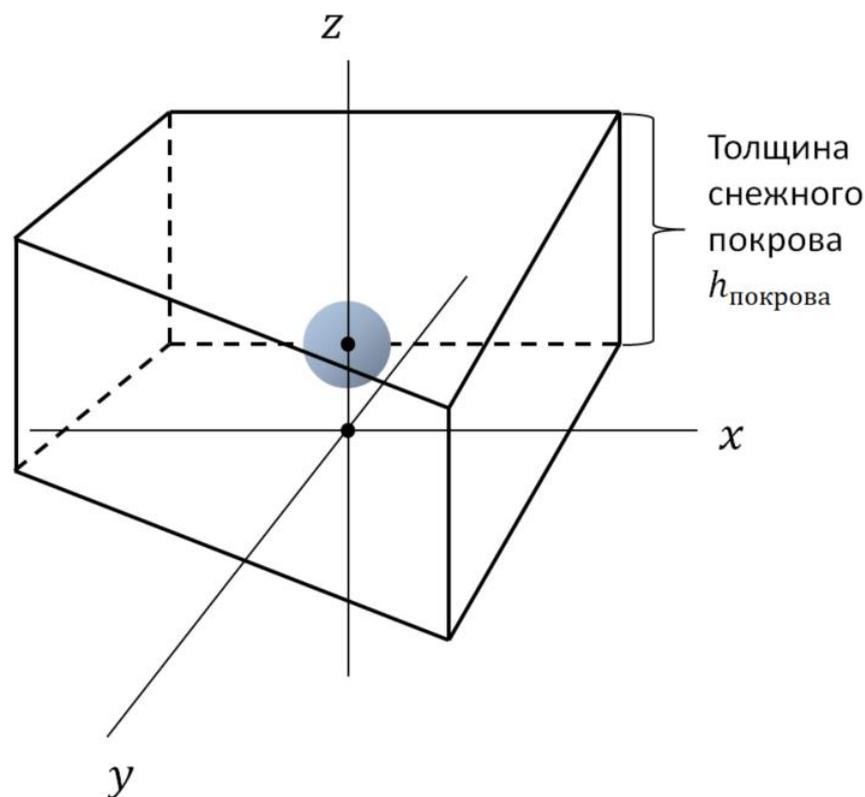


Рисунок 3.27 – Положение частицы внутри области начальных координат

Пространственные горизонтальные координаты частиц x, y определяют соответствующее значение вертикальной координаты z – высоту рельефа в заданной точке пространстве. Затем к величине z добавляется случайная величина, распределённая равномерно, определённая в интервале $[0; \text{высота снежного покрова}]$. Форма области начальных координат и положение частицы приводятся на Рисунке 3.27.

Начальные скорости определяются равными 0, что соответствует статичному состоянию покоя снежных масс в момент до отрыва от поверхности.

Дальнейшее моделирование лавины происходит с учётом заданной характеристики взаимодействия между частицами, обусловленной состоянием снега – сухого либо влажного. Функция, определяющая профиль склона, представлена билинейной интерполяцией ЦМР. Динамика частиц описывается законами классической механики в условиях сил упругого и вязкого взаимодействия.

В ходе процедуры генерации начальных состояний частиц, описанной выше, в пространстве создаётся N частиц, заключённых в пределах четырёхугольника в проекции xu , определённого высотой снежного покрова в соответствующей области ЦМР. Его объём возможно определить, считая его телом постоянной толщины – путём умножения площади четырёхугольника на высоту снежного покрова.

$$V_{\text{масс}} = S_{\text{осн}} \cdot h_{\text{покрова}}, \quad (3.3)$$

где $S_{\text{осн}}$ – площадь четырёхугольного полигона, $h_{\text{покрова}}$ – толщина моделируемого покрова.

Так же возможно рассчитать объём, который могут занять частицы – путём умножения объёма частиц на их количество:

$$V_{\text{частичный}} = \frac{\pi d_3^3}{6} \cdot N, \quad (3.4)$$

где N – число моделируемых сферических частиц.

В рамках задачи плотной упаковки равных сфер доказана оптимальная оценка соотношения объёма сфер к заполняемой упаковке, равная $\frac{\pi}{3\sqrt{2}}$. Эту оценку, возможно, считать нижней границей, при которой равномерное распределение частиц может создать непересекающиеся объекты, что характерно для разреженного состояния системы. Тогда оценка характерного критического числа разреженных частиц составляет

$$N_{\text{разр}} = \frac{2 \cdot S_{\text{осн}} \cdot h_{\text{покрова}}}{\sqrt{2} \cdot d_3^3}. \quad (3.5)$$

В случае если частицы генерируются в числе, превышающем $N_{\text{разр}}$, пересечения неизбежны, что определяет ситуацию, в которой начальное состояние снежной массы становится преднапряжённым – это может соответствовать опрессовыванию снега перед сходом (что может быть представлено в условиях неоднородности послойной структуры снежного покрова). Тогда в рамках моделирования возможно возникновения всплесков

снежной массы на начальных этапах. В последующих этапах моделирования такие всплески нивелируются и теряются в общей массе.

Последующее наращивание числа частиц приводит к существенному уплотнению начальных координат частиц, и как следствие – наращивание потенциала сил эластичного взаимодействия между частицами. Экспериментально установлено, что при достижении соотношения $V_{\text{частичный}} / V_{\text{масс}}$ порядка 10, возникает явление взрыва – неадекватного поведения системы, при котором частицы, расположенные на внешней стороне множества, получают начальный импульс, вызывающий неадекватное поведение лавины. Тогда оценка характерного критического числа уплотнённых частиц составляет

$$N_{\text{крит}} = 60 \cdot \frac{S_{\text{осн}} \cdot h_{\text{покрова}}}{d_3^3} . \quad (3.6)$$

Тогда частицы разлетаются в форме струй, не касающихся поверхности склона. Пример такого явления представлен на Рисунке 3.28.

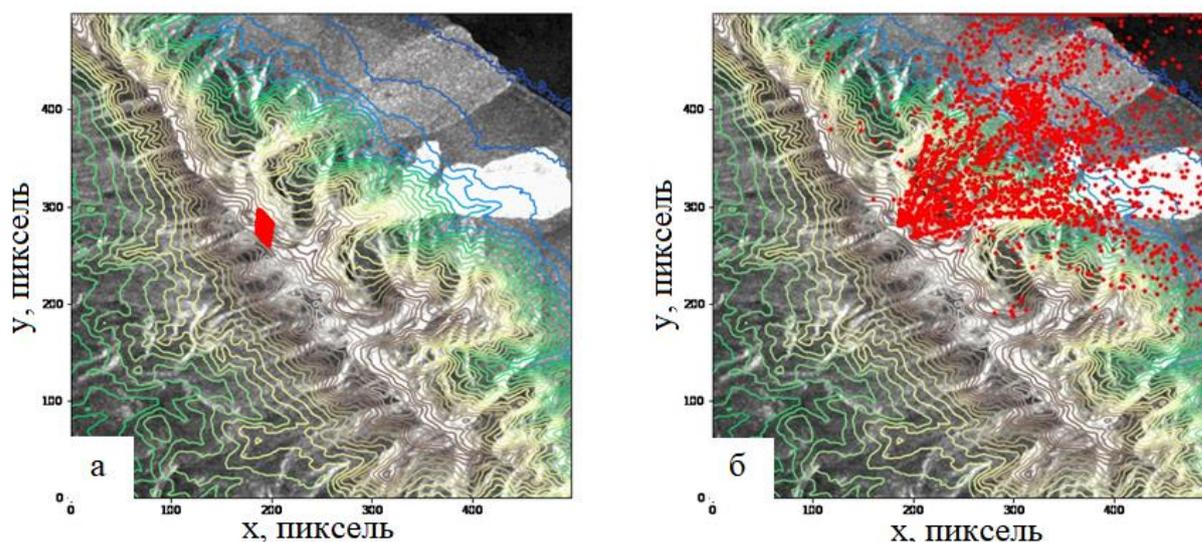


Рисунок 3.28 – Начальное положение частиц (а), положение частиц по прошествии 2 секунд модельного времени (б)

Таким образом, для числа частиц, участвующих в моделировании определены теоретическая и экспериментальная значения оценок. Эти

значения с оценками влияния на процесс моделирования, установленные в ходе экспериментов, приведены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 Сравнительная характеристика режимов моделирования динамики сглаженных частиц в условиях различного числа частиц

Число частиц моделирования	Характеристика плотности снежных масс	Потенциальные проблемы моделирования	Преимущества моделирования
$1 < N < N_{разр}$	Разряженная	Недостаточная информативность, слабая обоснованность результатов	Моделирование оперативно
$N_{разр} \leq N < N_{крит}$	Уплотнённая	Локальные искажения начального поведения структуры	Моделирование носит комплексный характер
$N > N_{крит}$	Критически уплотнённая	Неадекватное физическое поведение, требуются огромные вычислительные мощности	Нет

Дальнейшее уточнение и дополнение классификации критических оценок может быть дополнено на основе выделения частных классов результатов моделирования.

3.4 Оценка адекватности моделирования динамики снежной лавины с применением почти периодического анализа

Для объективной валидации результатов численного моделирования схода снежной лавины методом SPH предлагается подход, основанный на двух метриках – точности и полноте. Оценки количественно определяют соответствие пространственного распределения частиц, полученного в ходе моделирования, эталонной зоне отложений сошедшей лавины [165, 168, 169].

В качестве эталона для сравнения используется маска изображения лавины, представленная набором сопряженных аппроксимирующих четырёхугольных полигонов, формируемая на основе экспертной оценки. Полигональный характер структуры позволяет определять принадлежность частиц пространству маски на основе математических законов, что позволяет эффективно ускорять расчёты оценок.

Результатом моделирования методом SPH является множество пространственных координат частиц. Для определения площади, занимаемой частицами, формируется выпуклая оболочка, представленная полигоном, вершины которого представлены координатами частиц, соединяемые отрезками. Такая форма позволяет определять точную площадь, занимаемую множеством частиц в пространстве моделирования.

Первая оценка, вводимая для оценки качества моделирования – точность. Оценка определяет долю частиц, вошедших по результатам моделирования в маску сошедшей лавины, в общем числе моделируемых частиц.

$$P = \frac{N_{in}}{N_{total}}, \quad (3.7)$$

где N_{in} – число частиц, попавших в маску изображения сошедшей лавины, N_{total} – общее число частиц.

Точность определяет долю частиц, попавших в маску, однако высокие результаты точности могут быть достижимы в случаях, когда частиц мало, либо когда их положение плотно сгруппировано внутри отдельной области маски. Таким образом, недостаток метрики точности связан с отсутствием учёта пространственного расположения частиц внутри маски.

Для учёта пространственного соответствия распределения частиц маске определена метрика полноты – как отношение площади полигона, охватывающего вошедшие в маску частицы, к площади всей маски изображения сошедшей лавины:

$$R = \frac{S_{in}}{S_{mask}}, \quad (3.8)$$

где S_{in} – площадь силуэта частиц, попавших в маску изображения сошедшей лавины, S_{mask} – площадь маски изображения сошедшей лавины.

Совместный анализ метрик позволяет определить систематические ошибки модели: высокая точность с низкой полнотой определяют недостаточное время моделирования, неправильный выбор параметров моделирования (например, силы трения); высокая полнота и низкая точность характерно для систематического нарушения границ маски – ситуации, при которой частицы расплываются в пространстве, формируя ложные области отложений.

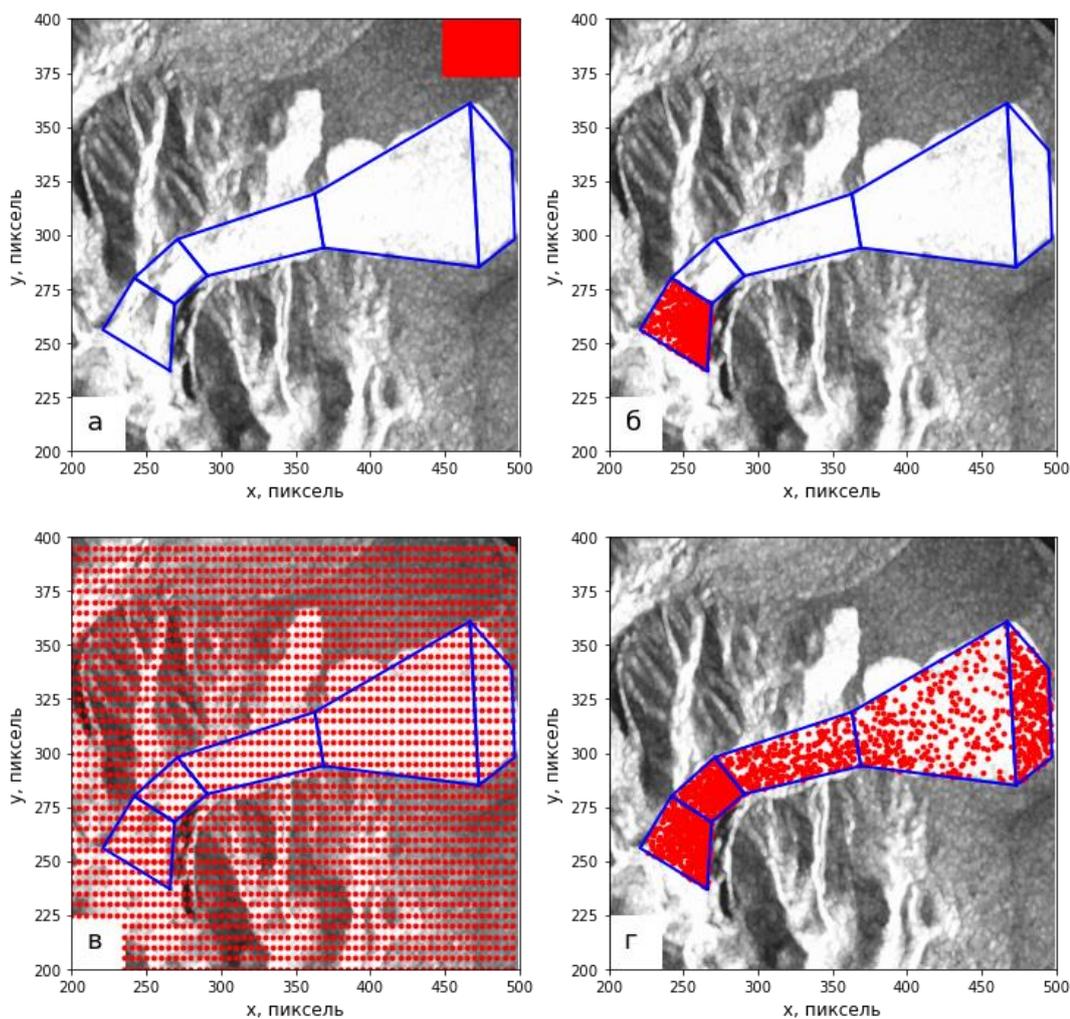


Рисунок 3.29 – Синтетические распределения частиц (красные точки), маска лавины (синие полигоны) на фоне моделируемой лавины, определяющие разнородные композиции метрик полноты и точности

Примеры композиций качественно разных показателей приводятся на Рисунке 3.29. Примеры приведены с градацией по строкам и столбцам – в первой строке приведены случаи, соответствующие низким показателям полноты: Рисунок 3.29(а): $R = 0$, Рисунок 3.29(б) $R = 0.12$; во второй строке: Рисунок 3.29(в) и Рисунок 3.29(г) – полнота близка к 1. В левом столбце значение метрики точность мало: Рисунок 3.29(а): $P = 0$, Рисунок 3.29(в): $P = 0.18$; в правом столбце – Рисунок 3.29(б) и Рисунок 3.29(г) – точность равна 1.

Таким образом, качество моделирования считается высоким, когда оба показателя – и полноты и точности – близки к 1. Результаты оценок для моделирования, учитывающего почти периодические структуры и моделирования, определяющего начальные положения в произвольном пространстве, приведены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 Оценки качества моделирования, полученные в различных начальных условиях

Условия моделирования	Точность	Полнота
Начальные координаты в четырёхугольнике, обусловленном геометрией полигона	~85%	~75%
Начальные координаты в четырёхугольнике, обусловленном геометрией полигона и почти периодами	~90%	~85%

Таким образом, применение оценок к моделированию лавины с учётом пространственных критериев лавинной опасности, обусловленных результатами почти периодического анализа, показало, что учёт структуры улучшил средние показатели качества моделирования на 5-10%.

Выводы по Главе 3

Приведены результаты применения почти периодического анализа к линейризованным данным изображений лавиноопасных областей. Структура срезов обобщенной сдвиговой функции показывает существенное место почти периодических характеристик пространственной структуры линейризованных данных. Установлена инвариантность результатов почти периодического анализа по отношению к методам статистической предобработки данных, устойчивость результатов по отношению к существованию теневых артефактов на изображении, а так же системный характер почти периодов в различных упорядоченных составляющих линейризованных структур графических данных о снежном покрове.

Показано, что почти периоды могут выступать основой для пространственных критериев лавинной опасности – как качественных, так и количественных – определяющих как возникновение схода снежных масс, так и его силу.

Показано, что устойчивость моделирования методом гидродинамики сглаженных частиц зависит от количества частиц, участвующих в модели. Малое число частиц приводит к низкой степени обусловленности результата, тогда как избыточно большое может привести к неадекватному поведению модели, и как следствие – неправильному прогнозу. Приведены оценки числа моделируемых частиц, обеспечивающие устойчивое моделирование.

Разработан и апробирован авторский подход к объективной оценке адекватности численного моделирования схода лавины методом SPH, основанный на метриках точности и полноты. Установлено, что использование для задания начальных координат частиц пространственных критериев лавинной опасности, выявленных методом почти периодического анализа, позволяет повысить средние показатели точности и полноты результатов моделирования на 5–10 % по сравнению со сценариями, учитывающими только геометрию полигона

ГЛАВА 4 . ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОЧТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

4.1 Алгоритмизация принятия решений при оценке лавинной опасности на основе почти периодического анализа

На основе установленной достоверности результатов применения почти периодического анализа к графическим данным снежного покрова с целью определения степени лавинной опасности и адекватности результатов моделирования сходов снежных лавин, основанного на пространственных почти периодических структурах возникает возможность синергии подходов и формирования единого программного комплекса поддержки принятия решений в задачах оценки лавинной опасности.

Основой работы комплекса является алгоритмическое обеспечение логики работы. Алгоритм, определяющий последовательность основных действий, представлен на Рисунке 4.1.

Алгоритм представляет структуру, состоящую из двух логически разбитых блоков – линейная последовательность обработки графических данных и блок моделирования схода лавины, учитывающий доступность метеорологических данных.

Первый блок включает следующие основные действия: выбор географической области исследования, загрузка графических данных и цифровых моделей рельефа, предобработка графических данных и почти периодический анализ, применяемый к предобработанным графическим данным. Второй блок предполагает проведение моделирования схода снежной лавины в условиях, зависящих от доступности метеорологической сводки на исследуемой территории в заданный временной интервал, и формирование рекомендаций.

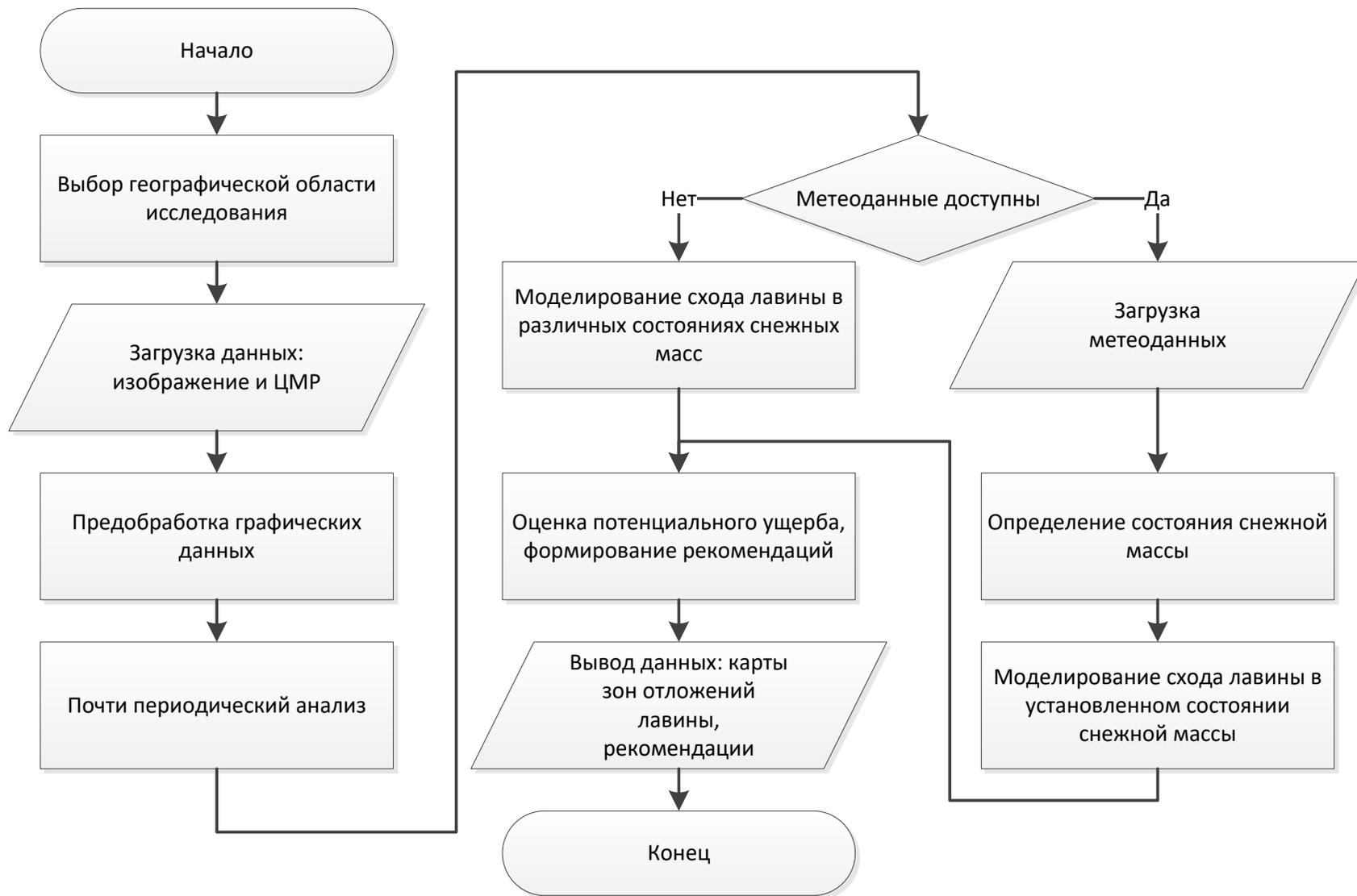


Рисунок 4.1 – Схема алгоритма поддержки принятия решений при оценке лавинной опасности

Рассмотрим подробнее этапы авторского алгоритма.

1. Выбор географической области исследования

Этап предполагает определение области исследования – географические координаты исследуемого сектора земного шара. Оснований для выбора может служить поступление новых данных дистанционного зондирования (спутниковый снимок, данные лидара), прогноз метеорологической службы о значительных осадках или резком потеплении; плановый мониторинг района в рамках превентивных мероприятий. В заданном районе предполагается получение графических данных о снежном покрове и цифровой модели рельефа.

2. Предобработка графических данных

Этап предполагает ряд операций над полученными графическими данными: приведение к монохромному формату, обрезка изображения в области интереса, синхронизация обрезанного изображения и цифровой модели рельефа, формирование аппроксимирующей структуры полигонов и последующая линейаризация изображения.

3. Почти периодический анализ

Этап предполагает проведение почти периодического анализа в отношении матрицы линейаризованных данных графического изображения: выбор строк и столбцов, расчёт значений обобщённой сдвиговой функции, определение существенных локальных минимумов, соответствующих пространственным почти периодам, формирующим критерии лавинной опасности.

4. Моделирование схода лавины

В зависимости от доступности метеорологической сводки данный этап проводится либо с учётом априорных сведений о состоянии снежной массы, либо в условиях неопределённости возможно проведение моделирования в условиях сухого либо влажного снега.

5. Определение потенциального ущерба

На основе результатов моделирования определяются зоны отложения снежной лавины. В определённых зонах производится определение объектов, попадающих в зону поражения (дороги, строения, линии электропередачи). На основе данных скорости и давления снежных масс оценивается ущерб и формируются рекомендации – эвакуация, искусственный спуск. Так же возможно формирование рекомендаций по объёмам применяемых сил и средств ликвидации последствий схода лавины.

Алгоритм обеспечивает переход от комплекса неструктурированных графических данных и цифровой модели рельефа к обоснованным и интерпретируемым прогнозам лавинных отложений и управленческим решениям.

4.2 Архитектура программного комплекса для оценки лавинной опасности

В соответствии с разработанным алгоритмом поддержки принятия решений была реализована модульная архитектура программного комплекса. Архитектура основана на принципе сквозного конвейера данных, в котором каждый из шести модулей выполняет независимые последовательные преобразования [93, 94, 96, 98]. Выходные данные одного блока являются входными для последующего, что обеспечивает атомарность работы компонентов, позволяющую модифицировать и тестировать компоненты. Общая схема взаимодействия модулей представлена в графическом виде на Рисунке 4.2.

Первый модуль предназначен для первичной обработки растровых изображений лавиноопасных районов. Его основная задача заключается в преобразовании исходных разнородных данных к стандартизированному виду, пригодному для последующего автоматизированного структурного анализа.

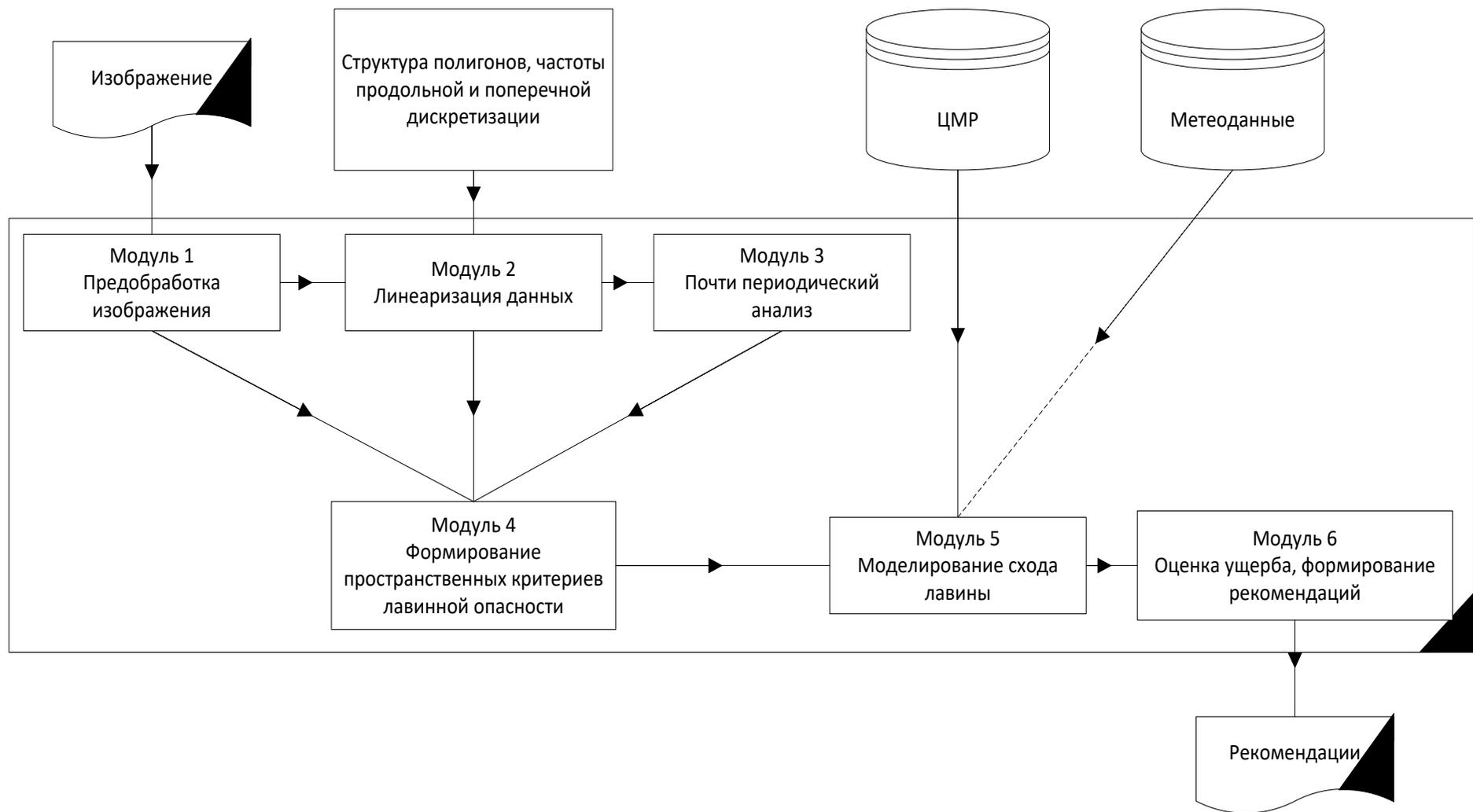


Рисунок 4.2 – Архитектурная схема модулей программного комплекса

Входные данные: Модуль принимает на вход растровые изображения в формате RGB, представленные в виде трёхмерного тензора яркости $I_{RGB} \in \mathbb{R}^{H \times W \times 3}$, где H и W — исходные высота и ширина изображения в пикселях.

Выходные данные: Результатом работы модуля является матрица яркостей монохромного изображения, обрезанного до области интереса $I' \in \mathbb{R}^{H' \times W'}$.

Функциональные процедуры модуля:

1. Загрузка и валидация данных:

Загрузка изображения и сопутствующих геопространственных метаданных. Проверка целостности данных и корректности цветового профиля.

2. Определение области интереса:

Автоматическое или полуавтоматическое (с участием оператора) выделение географически релевантной части изображения, соответствующей лавиноопасному склону. Алгоритм может использовать данные цифровой модели рельефа (ЦМР) для выделения зон с критическим уклоном. Результат — обрезанный тензор $I'_{RGB} \in \mathbb{R}^{H' \times W' \times 3}$.

3. Преобразование в монохромное представление:

Конвертация цветного изображения в одноканальную матрицу яркостей. Преобразование выполняется по формуле, согласованной с особенностями человеческого восприятия:

$$I' = 0.299 \cdot I'_{RGB} R + 0.587 \cdot I'_{RGB} G + 0.114 \cdot I'_{RGB} B,$$

где $I'_{RGB} R$ — срез тензора I'_{RGB} , представляющий матрицу красных оттенков пикселей, $I'_{RGB} G$ — срез тензора I'_{RGB} , представляющий матрицу зелёных оттенков пикселей, $I'_{RGB} B$ — срез тензора I'_{RGB} , представляющий матрицу синих оттенков пикселей.

4. Коррекция артефактов:

Для повышения качества последующего анализа модуль включает процедуры нивелирования нежелательных эффектов, таких как:

Коррекция теней:

Компенсация неравномерного освещения склона с использованием методов и алгоритмов фильтрации, основанных на анализе гистограмм.

Сглаживание шумов:

Применение адаптивных фильтров (например, медианного или фильтра Гаусса) для подавления шума, вызванного атмосферными условиями или особенностями сенсора.

Все корректирующие преобразования сохраняют исходную размерность матрицы I' .

Архитектурная роль: Модуль выполняет роль интерфейса между сырыми данными дистанционного зондирования и аналитическим ядром системы, обеспечивая редукцию данных и повышение информативности входного сигнала.

Второй модуль реализует этап геометрической коррекции. Его предназначение – трансформировать данные из исходной пиксельной (декартовой) системы координат изображения в ортогональную систему, согласованную с физической геометрией склона.

Входные данные: Матрица яркостей монохромного изображения $I' \in \mathbb{R}^{H' \times W'}$, структура аппроксимирующих полигонов $P \in \mathbb{R}^{N \times 2 \times 2}$, где N – количество полигонов, каждый из которых задан двумя точками, определяющими его базовую линию на склоне, параметры дискретизации: частота продольной дискретизации N_l (вдоль линии ската) и частота поперечной дискретизации N_p (вдоль линии уровня).

Выходные данные: Матрица линеаризованных данных $A \in \mathbb{R}^{N_l \times N_p}$, где каждая строка соответствует постоянной высоте (линии уровня), а каждый столбец – фиксированному расстоянию вдоль склона (линии градиента).

Функциональные процедуры модуля

1. Построение геометрической модели

На основе структуры полигонов P и связанной с изображением ЦМР строится непрерывная модель поверхности склона. Определяются векторные поля направлений градиента и линий уровня.

2. Вычисление преобразования координат

Для каждого узла целевой сетки с индексами (i, j) , где $i=1\dots N_l$, $j=1\dots N_p$, вычисляются соответствующие координаты (x, y) в пространстве исходного изображения.

3. Интерполяция яркости

Значение яркости для узла $A[i, j]$ определяется путём билинейной интерполяции значений матрицы I' в окрестности найденной точки (x, y) .

4. Визуализация и управление

Модуль предоставляет инструменты для визуализации исходного изображения, наложенной сетки аппроксимирующих полигонов и результирующей линеаризованной матрицы. Пользователь может интерактивно корректировать параметры дискретизации N_l и N_p для управления детализаностью и размерностью выходных данных.

Архитектурная роль: Данный модуль реализует пространственное преобразование, обеспечивая инвариантность последующего анализа к проекционным искажениям и закладывая основу для корректного выявления пространственных закономерностей, привязанных к реальной геометрии склона.

Третий модуль является аналитическим ядром комплекса, реализующим метод почти периодического анализа для выявления скрытых структурных инвариантов в снежном покрове.

Входные данные: Матрица линеаризованных данных $A \in \mathbb{R}^{N_l \times N_p}$.

Выходные данные: Наборы характерных почти периодов $\tau_p, \tau_l \in \mathbb{N}$, измеряемые в количестве узлов дискретизации матрицы A в поперечном (p) и продольном (l) направлениях.

Рассмотрим функциональные процедуры модуля.

1. Селекция и предобработка профилей

Пользователь может выбрать для анализа произвольные строки (поперечные профили) или столбцы (продольные профили) матрицы A .

2. Расчёт обобщённой сдвиговой функции (ОСФ):

Для выбранного одномерного профиля данных $A[k]$, $k = 1 \dots K$, вычисляли функцию $a(\tau, \Delta t)$:

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

3. Визуализация функции ОСФ

Модуль предоставляет средства для визуального анализа рассчитанных функций. Поверхность ОСФ может отображаться в виде тепловой карты или трёхмерного графика. Доступно построение срезов (сечений) функции при фиксированном значении Δt .

4. Автоматизированный поиск локальных минимумов

На срезах функции $a(\tau)$ алгоритмически определяются позиции локальных минимумов. Аргументы τ этих минимумов интерпретируются как значения почти периодов.

Рассмотрим архитектурную роль.

Модуль выступает в роли детектора структурных инвариантов, преобразуя пространственные данные в компактный набор количественных метрик, описывающих внутреннюю ритмику снежного покрова.

Четвёртый модуль осуществляет переход от математических инвариантов к прикладным критериям оценки риска, выполняя пространственную сегментацию и интерпретацию данных.

Входные данные: матрица линеаризованных данных $A \in \mathbb{R}^{N_l \times N_p}$, пространственные почти периоды $\tau_p, \tau_l \in \mathbb{N}$, исходное монохромное изображение области интереса $I' \in \mathbb{R}^{H' \times W'}$.

Выходные данные: пространственные маски (размеченные области) лавинной опасности на линеаризованной матрице и исходном изображении, координаты вершин полигонов $S \in \mathbb{R}^{M \times 4 \times 2}$, описывающих зоны высокой лавинной опасности в пиксельной системе координат изображения I' .

Рассмотрим функциональные процедуры модуля.

1. Разметка почти периодической структуры

На матрицу A накладывается регулярная сетка с шагами τ_l и τ_p . Границы ячеек этой сетки соответствуют выявленным структурным границам в снежном покрове.

2. Определение пространственных критериев

Качественный критерий K_p : Границы, ориентированные поперёк склона (между строками матрицы A), идентифицируются как потенциальные плоскости отрыва. Их пространственная частота и выраженность оцениваются количественно на основе почти периодов.

Количественный критерий K_v : Для областей между выделенными границами оценивается потенциальный объём снежной массы на основе характерных почти периодов.

3. Синтез карты опасности

На основе комбинации критериев K_p и K_v выполняется классификация ячеек сетки по уровням опасности (низкий, средний, высокий). Ячейки, отнесённые к однородным категориям опасности, объединяются в зоны.

4. Обратное проецирование

Координаты границ опасных зон в пространстве линеаризованной матрицы A трансформируются обратно в пиксельные координаты исходного

изображения I' с использованием преобразования, обратного выполненному в Модуле 2. Результатом является набор полигонов S .

5. Визуализация

Обеспечивается наложение результатов разметки (сетки почти периодов, границ, зон опасности) как на линейаризованную матрицу A , так и на исходное изображение I' .

Архитектурная роль: Модуль выполняет функцию семантического интерпретатора, переводя абстрактные периоды в конкретные, локализованные в географическом пространстве области риска, готовые для моделирования.

Пятый модуль предназначен для верификации гипотез о лавинной опасности путём построения и расчёта физической модели процесса. Моделирование основано на методе гидродинамики сглаженных частиц.

Входные данные: координаты вершин полигонов $S \in \mathbb{R}^{M \times 4 \times 2}$, задающих области возможного отрыва снежной массы в пространстве изображения, цифровая модель рельефа (ЦМР), географически привязанная к изображению.

Опциональные данные: метеорологические сведения: температура воздуха, тип снега (сухой/влажный), плотность снежного покрова, используемые для калибровки параметров модели.

Выходные данные: карта распределения отложений снежной массы после схода, траектория движения фронта и основных масс лавины, пространственные распределения расчётных параметров: скорость, давление, высота снежного покрова в зоне транзита и отложения.

Рассмотрим функциональные процедуры модуля.

1. Синхронизация данных и построение трёхмерной сцены

На основе ЦМР и полигонов S строится трёхмерная модель рельефа. Полигоны проецируются на эту поверхность, определяя объёмные области зарождения лавины.

2. Инициализация системы частиц

Заданные области заполняются дискретными частицами, представляющими элементарные объёмы снега. Количество частиц, их начальная масса и плотность являются управляемыми параметрами, зависящими от разрешения модели и оценок из Модуля 4.

3. Параметры взаимодействия

Пользователь имеет возможность настройки и выбора значений коэффициентов трения о грунт и внутреннего трения.

4. Параметры интегрирования

Пользователь имеет возможность настройки и выбора значений шага по времени, общего времени моделирования, граничных условий.

5. Интегрирование уравнений движения

Положение и скорость частиц обновляются согласно второму закону Ньютона с использованием численных методов решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

6. Визуализация результатов

По окончании расчёта визуализируется динамика частиц, строится финальная карта отложений, рассчитываются и отображаются итоговые траектории и профили скоростей.

Рассмотрим архитектурную роль.

Модуль является верификационным симулятором, обеспечивающим физическое обоснование прогнозов, сделанных на предыдущих аналитических этапах, и позволяющим оценить возможные последствия в конкретных топографических условиях. Использование метода SPH обеспечивает естественное описание таких сложных явлений, как фрагментация, образование прыгающей лавины и взаимодействие снежных масс с препятствиями.

Шестой модуль является заключительным аналитическим звеном комплекса, переводящим результаты физического моделирования в

практическую плоскость для поддержки принятия управленческих решений. Его задача заключается в оценке потенциальных последствий прогнозируемого лавинного события и формирование структурированных рекомендаций по минимизации рисков.

Результаты моделирования из модуля 5: траектория движения снежных масс, зона и параметры отложения, цифровая модель рельефа высокой детализации, векторные слои инфраструктуры: расположение зданий, инженерных сооружений (ЛЭП, мачты связи), транспортных артерий (дороги, железнодорожные пути), рекреационных зон [56,84].

Карта рисков с выделением зон поражения различной степени тяжести, количественная оценка потенциального ущерба (физического, экономического), структурированный отчет с рекомендациями для органов власти, служб МЧС и хозяйствующих субъектов.

Рассмотрим функциональные процедуры модуля.

1. Пространственный анализ воздействия

Наложение рассчитанной зоны отложения и зоны максимального динамического давления на карту инфраструктуры.

Определение объектов, попадающих в зону прямого воздействия. Классификация уровня угрозы для каждого объекта на основе рассчитанных параметров (давление $> X$ кПа, скорость $> Y$ м/с).

2. Оценка потенциального ущерба

Для инженерных сооружений: Использование уязвимости моделей, связывающих параметры лавины (давление, скорость, высота снежного выноса) с вероятностью повреждения или разрушения различных типов конструкций.

Рассмотрим потенциальные прямые и косвенные финансовые потери на основе стоимостных моделей ущерба и данных о стоимости объектов.

3. Моделирование сценариев

Оценка эффективности различных превентивных мер (установка лавинозадерживающих сооружений, проведение профилактических спусков) через их виртуальное внедрение в модель и повторный расчет (итерация с Модулем 5).

Прогноз развития ситуации при изменении метеоусловий (например, увеличение интенсивности осадков).

4. Генерация рекомендаций

Формирование перечня первоочередных действий для служб реагирования: закрытие дорог/склонов, эвакуация, приведение в готовность спасательных формирований.

Разработка долгосрочных рекомендаций для территориального планирования: ограничение застройки в опасных зонах, проектирование защитных сооружений, корректировка маршрутов.

Подготовка вариантов решений с оценкой их предполагаемой эффективности и стоимости.

5. Формирование итогового отчета и визуализация

Автоматическая генерация комплексного отчета, включающего картографические материалы, графики, таблицы с оценками и текст рекомендаций.

Создание интерактивной карты для ситуационного центра, отображающей в реальном времени зоны риска, потенциальный ущерб и оптимальные маршруты для реагирования.

Архитектурная роль: Модуль замыкает цикл "данные-прогноз-решение", предоставляя лицу, принимающему решение (ЛПР), готовый набор обоснованных вариантов действий для управления риском.

Представленная модульная архитектура задаёт высокоуровневую логику работы комплекса, определяя последовательность этапов обработки данных и форматы их взаимодействия [98].

Для практической реализации, детализации алгоритмов и однозначной спецификации функциональных обязанностей каждого компонента требуется более глубокая декомпозиция.

Схема представлена в графическом формате на Рисунке 4.3.

Система логически распределена на три функциональных единицы – подсистему анализа графических данных, модуль моделирования снежной лавины и блок оценки ущерба.

Подсистема анализа графических данных включает в себя модули и блоки, обеспечивающие подготовку и исследование изображения с целью выявления характерных пространственных областей повышенной лавинной опасности. Она включает в себя логику работы первых четырёх модулей комплекса.

Первый модуль декомпозируется с разбиением на необходимые блоки обрезки и приведения к монохромному виду и опциональный набор блоков фильтрации изображения. Очередность прохождения информации через блок не приводится, так как последовательность процедур предобработки изображения не влияет на результат.

Второй модуль декомпозирован с выделением трех основных блоков – блока разметки аппроксимирующих полигонов, блока управления частотами дискретизаций и конечного блока линеаризации монохромного изображения, поступающего на вход. Работа последнего блока основана на алгоритме линеаризации, приведённом в главе 2 диссертации, и требует для выполнения всех трех компонент. Таким образом, данный модуль содержит явную очередность выполнения модулей, необходимую для завершения работы.

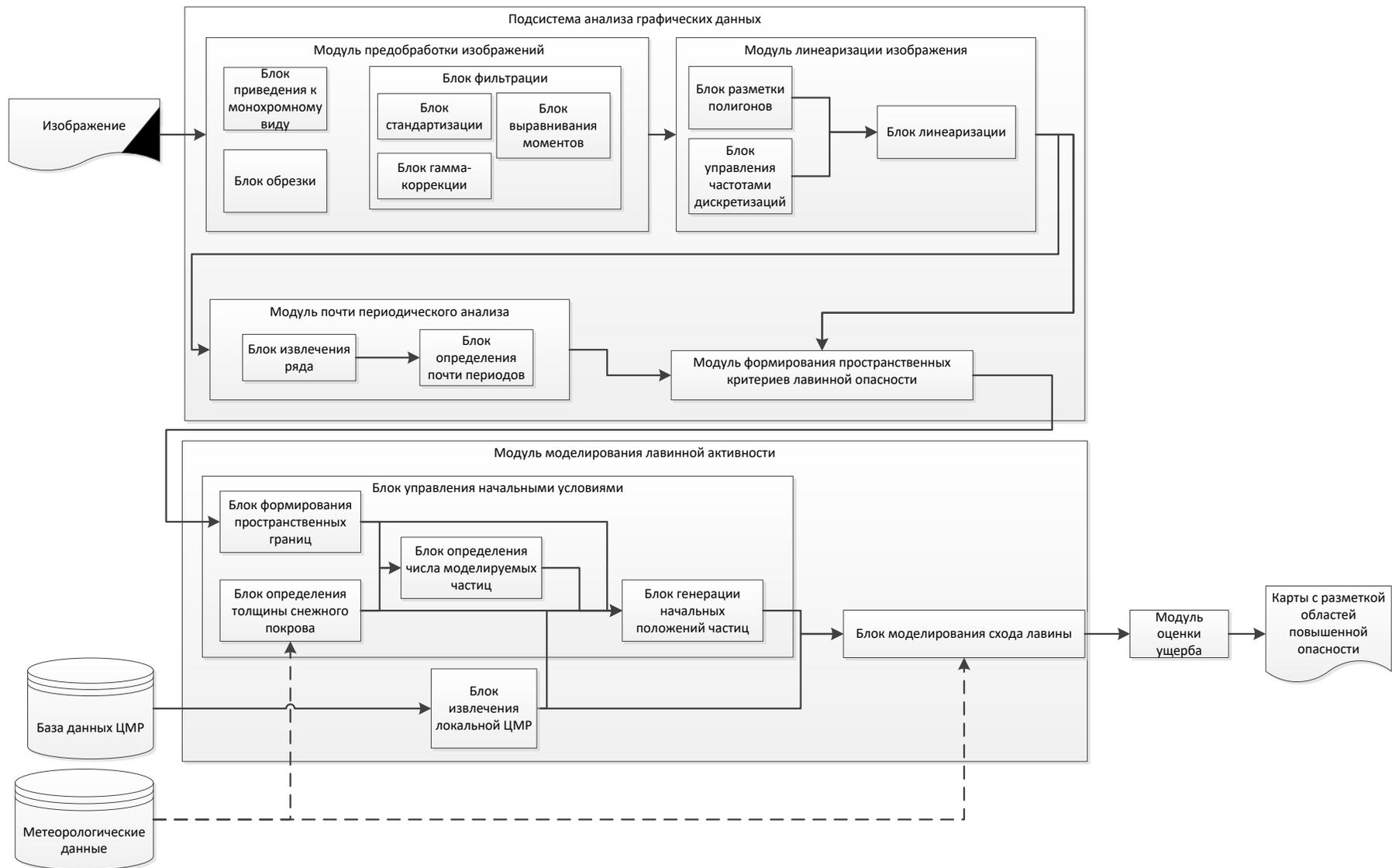


Рисунок 4.3 – Детализированная структурно-функциональная схема программного комплекса, отображающая декомпозицию модулей на внутренние блоки обработки данных

Третий модуль выделяет два основных функциональных блока – блок извлечения ряда из матрицы линеаризованных данных (строки или столбца) и блок определения почти периодов, включающий реализацию основной аналитической нагрузки. Данные извлеченного ряда являются входными для блока определения, информационный поток в модуле строго последователен.

Четвёртый модуль не подразумевает декомпозиции ввиду своей интерпретационной и синтезирующей природы, а также отсутствия внутренней вычислительной сложности, сравнимой с другими модулями.

Декомпозиция пятого модуля на представленные функциональные блоки обусловлена необходимостью четкого разделения ответственности между этапами подготовки данных, управления параметрами модели и выполнения ресурсоемких вычислений. В отличие от предыдущих модулей, где преобладала последовательная линейная обработка, модуль реализует комплексный физический эксперимент, требующий согласованной работы независимых блоков.

Блок управления начальными координатами учитывает множество факторов, обеспечивающих формирование множества частиц, обусловленное предопределёнными критериями лавинной опасности и обеспечивающих устойчивое моделирование схода лавины. Блок определения толщины снежного покрова может опираться на метеорологические данные, либо определять величину толщины в априорных фиксированных значениях.

На основе сформированных границ, основанных на пространственных критериях лавинной опасности, и толщины снежного покрова определяется число частиц, обеспечивающих устойчивость процесса моделирования.

На основе данных ЦМР, пространственных характеристик области начальных координат и числа частиц выполняется генерация множества и передача координат частиц в блок, реализующий моделирование движения снежной массы.

Таким образом, система блоков модуля подчиняется упорядочиванию последовательности исполнения для достижения результата.

Блок моделирования схода лавины может проводить моделирование в условиях, обеспеченных реальными метеорологическими данными, либо в условиях, заданных пользователем на основе экспертных оценок.

Модуль оценки ущерба представляет собой конечный, неделимый пункт принятия решения в цепочке комплекса. Его сущность – специализированный интерфейс между вычислительным комплексом и экспертом, который формализует и представляет итоги работы всей системы в виде, пригодном для непосредственного действия, поэтому декомпозиция модуля в схеме не приводится.

4.3 Программная реализация оперативного моделирования гидродинамики сглаженных частиц.

Моделирование снежных лавин методом сглаженных частичных гидродинамик (SPH) предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам, поскольку адекватное воспроизведение физики процесса требует дискретизации объёма лавины на десятки и сотни тысяч взаимодействующих частиц [7, 57, 63, 64, 68, 84]. Эффективность и практическая применимость создаваемых моделей в решающей степени определяются производительностью их программной реализации, позволяющей проводить расчёты в условиях повышенной актуальности оперативности расчётов.

Первоначальные прототипы, разрабатываемые с целью верификации математического аппарата, как правило, не оптимизированы для высокопроизводительных вычислений. Их прямое использование для параметрических исследований или моделирования реальных сценариев часто оказывается невозможным из-за чрезмерно больших затрат машинного времени. Таким образом, задача создания не только корректного, но и эффективного вычислительного ядра является критически важным этапом в

разработке любого практико-ориентированного программного комплекса для численного моделирования.

Первоначальная реализация метода SPH была выполнена в парадигме объектно-ориентированного программирования (ООП). Этот подход был избран как наиболее интуитивно понятный и прозрачный для верификации математической модели на начальных этапах исследования.

При обосновании выбора архитектуры ООП-прототипа опирались на представление каждой частицы как экземпляра класса, инкапсулирующего её состояние и представленное набором пространственных координат (x, y, z) , набором покоординатных составляющих скорости движения (v_x, v_y, v_z) , геометрическим размером и массой.

Взаимодействие между частицами вычислялось через методы, принимающие другие объекты класса в качестве аргументов, расчёт сил взаимодействия внутри системы выполнялся через вложенные циклы.

Такой подход обладал преимуществами простого описания структуры взаимодействия, простоты модификации и высокой интерпретируемости программного кода.

Существенными недостатками подхода являлись высокая нагрузка на управление объектами класса, требующее выделения существенного объёма памяти, и осложнённое произвольным расположением объектов в памяти вычислительной машины. Кроме того, в рамках реализации не предполагалось применение распараллеливания вычислений. Все эти факторы обуславливали медленный процесс моделирования сходов лавин, что определяло явное направление переработки подхода для обеспечения оперативности формирования прогнозных оценок.

Для преодоления выявленных системных ограничений объектно-ориентированного прототипа была разработана и реализована многоуровневая стратегия архитектурного преобразования.

Стратегия предполагала последовательное применение трёх взаимодополняющих преобразований, каждое из которых было направлено на устранение конкретного класса проблем производительности, с сохранением корректности математической модели. Эти преобразования носили не изолированный, а синергетический характер: оптимизация на одном уровне создавала необходимые предпосылки для эффективной реализации улучшений на следующем, что в конечном итоге привело к кумулятивативному эффекту ускорения.

Первое преобразование: переход к массивному представлению данных. Исходная проблема заключалась в фундаментальном несоответствии объектно-ориентированной модели данных требованиям эффективного использования иерархической памяти современного процессора. При хранении каждой частицы в виде отдельного экземпляра класса, её атрибуты (координаты, скорости) располагались в оперативной памяти разрозненно и непредсказуемо. Такой способ организации приводил к так называемому «беспорядочному» доступу к памяти. Процессор, пытаясь прочитать координаты сотен частиц, вынужден был выполнять десятки тысяч обращений к случайным адресам, что практически полностью нивелировало преимущества кэш-памяти, предназначенной для ускорения работы с последовательными данными. Каждое такое обращение вызывало «промах кэша», требуя длительной подгрузки информации из основной памяти, что являлось основной причиной замедления вычислений [91].

Решение заключалось в переходе к противоположному паттерну – «структура массивов» (Structure of Arrays). Вся система была перестроена на основе единых многомерных массивов: были созданы отдельные массивы для хранения всех координат X, Y, Z, скоростей, сил и других параметров моделирования. Экспериментально установлено, что преобразование, нацеленное исключительно на оптимизацию работы с памятью, дало ускорение в 12-15 раз.

Второе преобразование: Непосредственная компиляция в машинный код. После оптимизации доступа к данным следующим «узким местом» стала сама природа языка Python как интерпретируемого. Каждая операция сопровождалась значительными непроизводительными затратами на анализ и выполнение инструкций интерпретатором. Для перевода вычислений на уровень, понятный процессору напрямую, был применён компилятор Numba, выполняющий оперативную (JIT) компиляцию.

Ключевые вычислительные функции были специальным образом помечены (декорированы) с использованием `@nb.njit(fastmath=True)`. Это позволяет переставлять математические операции, объединять умножение и сложение в одну команду и, задействовать векторные инструкции процессора.

Современные процессоры поддерживают наборы команд, которые позволяют одной инструкцией выполнить одну и ту же операцию (например, сложение) над целым набором чисел (например, над восемью координатами X одновременно). Этот принцип называется «одна инструкция – множество данных» (SIMD – Single Instruction, Multiple Data).

Таким образом, тяжёлый интерпретируемый код был заменён компактным, оптимизированным машинным кодом, специально сгенерированным для конкретного процессора. Данный шаг позволил исключить накладные расходы интерпретатора и максимально загрузить вычислительные блоки процессора полезной работой, обеспечив дополнительное ускорение в 25-30 раз.

Третье преобразование: массовое распараллеливание вычислений. После устранения проблем с памятью и интерпретацией основным ограничивающим фактором стало использование мощности лишь одного ядра процессора, в то время как современные процессоры имеют несколько ядер. Логика алгоритма моделирования методом сглаженных частиц идеально подходит для распараллеливания, так как сила, действующая на

каждую частицу, может вычисляться независимо от расчёта сил для других частиц в пределах одного временного шага. Такая задача относится к классу распараллеливания по данным.

Для реализации этого был использован механизм `nb.prange()`, предоставляемый Numba. Были применены дополнительные настройки для минимизации конфликтов при совместном доступе к памяти и оптимального распределения нагрузки. В результате производительность алгоритма стала практически линейно масштабироваться с увеличением числа ядер. На тестовой системе с 4 вычислительными ядрами это дало дополнительное ускорение в 3.8 раза, что близко к теоретическому максимуму [92].

Кумулятивный эффект от последовательного применения этих трёх преобразований носил мультипликативный характер. Таким образом, системный пошаговый подход к оптимизации, где каждое следующее улучшение строится на результатах предыдущего, позволил достичь общего прироста производительности более чем в 1000 раз по сравнению с исходным прототипом (Таблица 4.1).

Таблица 4.1 Сравнение времени шага моделирования для различных реализаций расчётной программы

Вариант реализации	Время расчета на 1 шаг (с)	Относительное ускорение
Базовый	~0.17	1
Векторизация вычислений	~0.006	~28
Параллельные вычисления	(0.00014;0.00024)	(700;1200)

Проведённое улучшение перевело модель из статуса исследовательского прототипа, пригодного лишь для верификации идей, в статус высокопроизводительного вычислительного ядра.

Выводы по Главе 4

В Главе 4 представлена разработка программного комплекса поддержки принятия решений, предназначенного для оценки лавинной опасности на основе методов почти периодического анализа. Комплекс реализует целостный сквозной конвейер обработки данных — от первичной загрузки спутниковых изображений до формирования верифицированных прогнозов и практических рекомендаций для органов управления.

Основой комплекса является формализованный алгоритм принятия решений, который структурирует процесс анализа в последовательность логических этапов: выбор географического района, предобработка данных, проведение почти периодического анализа, моделирование лавинного схода с учётом доступных метеоданных и оценка потенциального ущерба. Данный алгоритм обеспечивает переход от неструктурированных визуальных данных к количественным и интерпретируемым результатам.

Архитектура комплекса построена по модульному принципу и включает шесть специализированных модулей, соответствующих ключевым этапам алгоритма. Каждый модуль выполняет атомарную функцию, что обеспечивает гибкость, масштабируемость и возможность независимой модификации компонентов. Взаимодействие модулей организовано по принципу конвейера данных, что позволяет наращивать функциональность без перепроектирования системы в целом.

Отдельное внимание уделено технической реализации вычислительного ядра, в частности — оптимизации моделирования методом сглаженных частиц. За счёт переработки программного кода удалось достичь ускорения моделирования более чем в 1000 раз по сравнению с исходным прототипом. Это делает комплекс пригодным для оперативной работы в условиях, требующих высокой скорости обработки данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена научная задача повышения эффективности мониторинга лавинной опасности путем совершенствования алгоритмического инструментария для обработки и анализа слабоструктурированных данных о снежном покрове, учитывающих метеорологические и геоморфологические факторы, влияющие на лавинную активность.

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты.

1. Проведён обзор современных подходов анализа, визуализации и трансформации данных в задачах прогнозирования лавинной опасности. Проведенный анализ выявил, что традиционные методы визуализации и анализа пространственно-временных данных (статистический анализ, физико-динамические модели, методы машинного обучения) обладают ограниченной эффективностью для оперативного мониторинга лавинной опасности. Основные ограничения заключаются в неспособности адекватно отображать и анализировать слабоформализованные, нелинейные и многомасштабные структурные закономерности снежного покрова. Установлено, что существующие подходы часто фокусируются на точечных измерениях или глобальных статистиках, не обеспечивая системного выделения инвариантных пространственных паттернов, связанных с лавинообразованием. Данный анализ позволил обосновать необходимость разработки новых специализированных методов, ориентированных на выявление скрытых структурных закономерностей.

2. Разработан компьютерный метод симметричной трансформации визуальных данных на основе локальных полигональных аппроксимаций. Метод обеспечивает геометрическую согласованность изображений лавиноопасных территорий с реальной формой склонов и сохраняет внутреннюю непрерывность признаков при преобразовании. В отличие от существующих подходов, предложенный метод допускает адаптивное

построение координатной сетки вдоль направления схода лавины, устраняет локальные искажения и создаёт основу для автоматизированного анализа структур снежного покрова. Практическая реализация метода выполнена в составе программного модуля трансформации данных, зарегистрированного как объект интеллектуальной собственности.

3. Разработан алгоритм поддержки принятия решений при оценке лавинной опасности по результатам почти периодического анализа пространственно-временных данных о снежном покрове. Эффективность алгоритма подтверждена экспериментальной апробацией на спутниковых изображениях, где совпадение прогнозов с фактическими данными составило до 90 %.

4. Апробация разработанного программно-алгоритмического комплекса обеспечения мониторинга лавинной опасности позволила выявлять наличие пространственных ритмичных устойчивых признаков лавиноопасных зон в структуре снежного покрова и проводить формализованный анализ количественной оценки лавинной активности. Разработанный программный комплекс обеспечил уменьшение времени, затрачиваемого на расчет, оценку опасности и формирование карт зон отложения снежных лавин, в 700-1200 раз по сравнению с первоначальной моделью.

5. На разработанное программное обеспечение и базы данных получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [84, 86, 90, 94, 95].

Перспективой дальнейших исследований является интеграция и адаптация разработанного программно-алгоритмического обеспечения системы мониторинга лавинной опасности в системы оповещения (мобильные, СМС, сирены), управления инфраструктурой (перекрытия дорог, оповещение транспорта) для повышения безопасности в лавиноопасных районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аджиев, А.Х. Математическое моделирование динамики снежных лавин / А.Х. Аджиев, М.Ю. Беккиев, Ю.В. Болгов // сборник научных трудов Высокогорного геофизического института «Физика облаков и активные воздействия. Склоновые процессы. Экологические проблемы. Загрязнение окружающей среды». Выпуск 100. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2017. – С. 97-106.
2. Аккуратов, В.Н. Генетическая классификация лавин: тр. Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции: в 2-х т. / В.Н. Аккуратов. – Нальчик, 1959. – Т. 1. – С. 206-226.
3. Аккуратов, В.Н. О методах определения границ лавиноопасных зон / В.Н. Аккуратов, Н.Ф. Нечаев //Тез. докл. всесоюзн. совещ. по изучению процессов формирования и схода лавин. Ташкент, 1963. – С. 65-66.
4. Аккуратов, В.Н. О расчетах вероятного максимального объема снежной лавины / В.Н. Аккуратов // В кн.: Снежные лавины (прогноз и защита). – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. – С.39-44.
5. Аккуратов, В.Н. О расчете максимальной дальности выброса лавин. / В.Н. Аккуратов, Э.Б. Красносельский, В.А. Иткин // В кн.: Снег и лавины Хибин. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. – С. 349-356.
6. Аккуратов, В.Н. Прогноз наступления лавинной опасности по величинам метелевого переноса и температурного сжатия снега. В кн.: Вопросы использования снега и борьба со снежными заносами и лавинами. – М., Изд-во АН СССР, 1956. – С.167-183.
7. Алешин, А.П. Метод SPH как эффективное средство при реализации численного моделирования процесса движения лавины / А.П. Алешин // 3D технологии в решении научно-практических задач: Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 29 сентября 2022 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский

государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2022. – С. 116-118.

8. Андреев, Ю.Б. Классификация риска стихийных явлений природы (на примере лавинной опасности) / Ю.Б. Андреев, А.Н. Божинский, Л.А. Ушакова // Жизнь Земли. – 1993. – Т. 28. – С. 53-56.

9. Андреев, Ю.Б. Сравнительная статистика натуральных и модельных катастрофических лавин / Ю.Б. Андреев, А.Н. Божинский // Материалы гляциологических исследований. – 2009. – № 107. – С. 121-123.

10. Андреев, Ю.Б. Сравнительная статистика параметров отложений реальных и модельных лавин / Ю.Б. Андреев, А.Н. Божинский, Л.А. Суханов // Материалы гляциологических исследований. – 2006. – № 100. – С. 172-175.

11. Ащепкова, В.В. Использование подходов семантической сегментации и детектирования в задаче распознавания лавин на изображениях / В.В. Ащепкова, Г.С. Листратенков // Искусственный интеллект в промышленных, коммерческих, медицинских и финансовых приложениях: сборник статей научно-технического семинара студентов кафедры "Инженерной кибернетики", Москва, 26-27 декабря 2024 года. – Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. – С. 14-21.

12. Баскаков, А.Г. Гармонический анализ периодических и почти периодических на бесконечности функций из однородных пространств и гармоничных распределений / А.Г. Баскаков, В.Е. Струков, И.И. Струкова // Математический сборник. – 2019. – Т. 210, № 10. – С. 37-90.

13. Бахвалов, Н.С. Исследование одномерного движения снежной лавины по плоскому склону / Н.С. Бахвалов, М.Э. Эглит // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. – 1973. – № 5. – С. 7-14.

14. Белоусов, Е.П. Создание карт лавинной опасности Республики Алтай / Е.П. Белоусов, В.Н. Копылов // Интеллектуальный потенциал Сибири: Материалы 31-ой Региональной научной студенческой

конференции: в 7 частях, Новосибирск, 22-26 мая 2023 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2023. – С. 127-129.

15. Благовещенский, В.П. Интеллектуальный анализ данных при прогнозировании снежных лавин и селевых потоков / В.П. Благовещенский, В.В. Жданов, С.У. Ранова // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: материалы Общероссийской научно-практической конференции, Москва, 14 марта 2025 года. – Москва: Геомаркетинг, 2025. – С. 70-76.

16. Благовещенский, В.П. Калибровка математических моделей лавин по данным о реальных лавинах в Иле (Заилийском) Алатау / В.П. Благовещенский, М.Э. Эглит, В.В. Жданов, Б.Б. Аскарбеков // Лёд и снег. – 2017. – Т. 57, № 2. – С. 213-220.

17. Благовещенский, В.П. Количественная оценка лавинной опасности малоизученных горных районов: специальность 11.00.07: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук / Благовещенский Виктор Петрович. – Москва, 1990. – 48 с.

18. Благовещенский, В.П. Опыт оценки и прогноза лавинной опасности в Швейцарии / В.П. Благовещенский, В.В. Жданов // Гидрометеорология и экология. – 2019. – № 1(92). – С. 178-190.

19. Благовещенский, П.В. География лавин / Т.Г. Глазовская, С.М. Мягков, В.Ф. Околов [и др.]. – Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. – Издательский Дом (типография), 1992. – 332 с.

20. Боброва, Д.А. История исследования лавинных процессов на острове Сахалин / Д.А. Боброва, Е.Н. Казакова // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 8. – С. 112-119.

21. Боброва, Д.А. Лавинная опасность равнинных территорий о. Сахалин / Д.А. Боброва // Лёд и снег. – 2013. – Т. 53, № 4. – С. 60-66.
22. Боброва, Д.А. О возможности использования данных о вовлеченных в лавину объектах для оценки ее параметров / Д.А. Боброва, И.А. Кононов, Н.А. Казаков // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18, № 1. – С. 101-105.
23. Боброва, Д.А. Оценка лавинной опасности на равнинных территориях о. Сахалин: специальность 25.00.36 "Геоэкология (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук / Боброва Дарья Андреевна. – Южно-Сахалинск, 2014. – 146 с.
24. Боброва, Д.А. Расчетная и фактическая максимальная дальность выброса лавины / Д.А. Боброва // ГеоРиск. – 2011. – № 4. – С. 24-26.
25. Божинский, А.Н. Математическое и физическое моделирование гравитационных лавинных потоков / А.Н. Божинский, Л.А. Суханов // Снежные лавины, сели и оценка риска: сборник трудов / Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Научно-исследовательская лаборатория снежных лавин и селей; под ред. А.Л. Шныпаркова. – Москва: НИЛ снежных лавин и селей Географического факультета МГУ, 2004. – С. 71-88.
26. Божинский, А.Н. Статистический анализ методов вероятностного крупномасштабного зонирования лавиносборов / А.Н. Божинский, Ж.Е. Молоткова // Лёд и снег. – 2010. – № 2(110). – С. 25-28.
27. Божинский, А.Н. Статистическое моделирование гравитационных лавинных потоков / А.Н. Божинский // Материалы гляциологических исследований. – 2006. – № 100. – С. 87-94.
28. Божинский, А.Н. Генерация воздушной волны лавин по результатам физического моделирования / Божинский А.Н., Суханов Л.А. // Материалы гляциологических исследований. – 1994. – Вып. 79. – С. 64-69.

29. Божинский, А.Н. Итоги и перспективы изучения снежных лавин, селей и других опасных природных явлений / А.Н. Божинский, В.Ф. Перов, Е.С. Трошкина, А.Л. Шныпарков // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2005. – № 2. – С. 68-74.
30. Божинский, А.Н. Основы лавиноведения / А.Н. Божинский, К.С. Лосев. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 280 с.
31. Божинский, А.Н. Физическое моделирование лавин с воздушной волной / Божинский А.Н., Суханов Л.А. // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1993. – № 5. – С. 69-79.
32. Васенин, Д.Н. Повышение точности краткосрочного прогнозирования нагрузки с использованием ансамблевых моделей и погодных данных / Д.Н. Васенин, С.Л. Подвальный, Н.В. Саввин // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2024. – № 4(58). – С. 72-87.
33. Викулина, М.А. Индивидуальный лавинный риск в Хибинах / М.А. Викулина // Лёд и снег. – 2011. – № 4(116). – С. 57-60.
34. Викулина, М.А. Оценка изменений лавинного риска в Хибинах / М.А. Викулина // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций, Москва, 11-14 декабря 2018 года. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2018. – С. 181-186.
35. Викулина, М.А. Оценка лавинной активности, опасности и риска (на примере Хибин): специальность 25.00.31 «Гляциология и криология Земли»: диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук / Викулина Марина Александровна. – Москва, 2009. – 230 с.
36. Викулина, М.А. Оценка лавинной активности, опасности и риска Хибин в среднем масштабе / М.А. Викулина // Лёд и снег. – 2012. – № S1. – С. 57-62.

37. Викулина, М.А. Оценка лавинной опасности на примере Хибин: методика и результаты / М.А. Викулина // Лёд и снег. – 2010. – № 4(112). – С. 62-70.

38. Высоцкая, И.А. Гармонический и спектральный анализ почти периодических на бесконечности последовательностей / И.А. Высоцкая, А.А. Рыжкова // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научно-технической конференции, Воронеж, 18-20 декабря 2017 года / Воронежский государственный университет. – Воронеж: Издательство «Научно-исследовательские публикации»; Общество с ограниченной ответственностью "Вэлборн", 2017. – С. 53-56.

39. Гвишиани, А.Д. Геофизические процессы в Арктике и системный анализ их воздействия на функционирование и развитие транспортной инфраструктуры / А.Д. Гвишиани, И.Н. Розенберг, А.А. Соловьев // Мир транспорта. – 2023. – Т. 21, № 3(106). – С. 6-34.

40. Дзюба, В.В. Генетическая классификация и диагностические признаки снежных лавин / В.В. Дзюба, М.Н. Лаптев, // Материалы гляциологических исследований. – 1984. – Вып. 50. – С. 97–104.85.

41. Еремин, И.В. Лавины и нейронные сети: анализ с помощью аэроснимков / И.В. Еремин // Материалы XIX Международной научно-практической конференции «Проблемы управления в социально-экономических и технических системах», Саратов, 13-14 апреля 2023 года. – Саратов: ИЦ «Наука», 2023. – С. 38-41.

42. Жданов, В.В. Статистический анализ многолетних данных о сходе снежных лавин и снежно-метеорологических условий в горах иле Алатау / В.В. Жданов, Н.У. Кужагельдина, А.Н. Камалбекова, Ү.Р. Алдаберген // География и водные ресурсы. – 2024. – № 2. – С. 99-110.

43. Жданов, В.В. Уточненная оценка лавинной опасности в районе снеголавинной станции "Шымбулак" / В.В. Жданов // Сборник докладов III

Международного симпозиума «Физика, химия и механика снега», Южно-Сахалинск, 02–06 октября 2017 года. Том Часть 2. – Южно-Сахалинск: Полиграфическая компания «Кано», 2017. – С. 50-54.

44. Заурбеков, Ш.Ш. Анализ проявления лавинных процессов в ландшафтах Чеченской Республике с применением ГИС-технологий / Ш.Ш. Заурбеков, Л.Р. Бекмурзаева, А.А. Батукаев // Инновационные технологии в производстве, науке и образовании: Международная научно-практическая конференция: Сборник тезисов, Грозный, 07-09 октября 2010 года / Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Л. Миллионщикова. – Грозный: Грозненский рабочий, 2010. – С. 57-58.

45. Заурбеков, Ш.Ш. Оценка потенциальной лавинной опасности в ландшафтах Чеченской республики / Ш.Ш. Заурбеков, М.Л. Алибасов, Л.Р. Бекмурзаева, А.А. Батукаев // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2013. – № 1(22). – С. 80-84.

46. Зорина, В.В. Использование спутниковых данных для эколого-геоморфологического районирования территорий / В.В. Зорина // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 11-15 ноября 2019 года / Институт космических исследований Российской академии наук. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2019. – С. 33.

47. Зорина, В.В. Применение радиолокационных спутниковых снимков Sentinel-1SAR для мониторинга льдов и снежного покрова в горах Кавказа / В.В. Зорина, П.Г. Михайлюкова // Научные исследования: итоги и перспективы. – 2020. – Т. 1, № 4. – С. 3-9.

48. Зорина, В.В. Объемный рельеф на плоских изображениях: исследуем сели и лавины по космическим снимкам / В.В. Зорина // Земля и Вселенная. – 2021. – № 5(341). – С. 38-47.

49. Казаков, Н.А. Генетическая классификация лавин и селей / Н.А. Казаков // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием: сборник материалов. В 2-х томах, Южно-Сахалинск, 26-30 мая 2015 года / под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой. Т. 2. – Южно-Сахалинск: Федеральное государственное унитарное предприятие «Издательство Дальнаука», 2015. – Р. 316-321.

50. Казаков, Н.А. Генетическая классификация лавин и селей / Н.А. Казаков // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием: сборник материалов. В 2-х томах, Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 года / под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой. Т. 2. – Южно-Сахалинск: Федеральное государственное унитарное предприятие «Издательство Дальнаука», 2015. – Р. 316-321.

51. Казаков, Н.А. Снежный покров и лавины: теоретические и практические аспекты: коллективная монография / Н.А. Казаков, Ю.В. Генсиоровский, С.П. Жируев, Д.А. Боброва, Е.Н. Казакова, И.А. Кононов, В.А. Лобкина, А.А. Музыченко, С.В. Рыбальченко. – Владивосток: Дальнаука, 2016. – 174 с.

52. Калач, А.В. Информационная поддержка прогнозирования динамики тропических циклонов на основе почти периодического анализа изображений / А.В. Калач, А.А. Парамонов, А.Л. Шкерин // Сборник статей XIII национальной научно-практической конференции с международным участием «Моделирование энергоинформационных процессов», Воронеж, 24-26 декабря 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2025. – С. 24-28.

53. 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.

54. Калач, А.В. Онтологическая модель почти периодического анализа данных с упорядоченным аргументом / А.В. Калач, А.А. Парамонов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2025. – № 1. – С. 101-114.

55. Калач, А.В. Оценка опасности зон структуры тропических циклонов на основе почти периодического анализа / А.В. Калач, А.А. Парамонов, А.Л. Шкерин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2025. – № 2. – С. 16-28.

56. Калач, А.В. Анимация модели снежных лавин / А.С. Соловьев, А.В. Калач, Т.Е. Смоленцева, Т.В. Лентяева // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы», Воронеж, 18-19 мая 2022 года. Том 1. – Иваново: ИПК «ПресСто»; Воронежский институт ФСИН России, 2022. – С. 445-448.

57. Калач, А.В. Имитационное моделирование динамики снежных лавин / А.В. Калач, А.С. Соловьев, Т.В. Лентяева // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 1. – С. 25-32.

58. Калач, А.В. Компьютерное моделирование взаимодействия снежных лавин со зданиями различного типа / В.Н. Бобров, С.Л. Карпов, А.С. Соловьев, А.В. Калач // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2019. – № 4. – С. 44-53.

59. Калач, А.В. Компьютерное моделирование воздействий снежной лавины на объекты инфраструктуры в условиях чрезвычайной ситуации / А.В. Калач, А.С. Соловьев, Т.В. Лентяева // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2025. – № 1(73). – С. 30-40.

60. Калач, А.В. Моделирование взаимодействия снежной лавины со смещаемыми и разрушаемыми препятствиями / А.В. Калач, С.Л. Карпов, Л.Д. Карпов, А.И. Ситников // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 11-13 ноября 2019 года / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2020. – С. 847-851.

61. Калач, А.В. Моделирование движения снежной лавины / А.В. Калач, А.С. Соловьев, Т.В. Лентяева // Технологии техносферной безопасности. – 2025. – № 1(107). – С. 116-133.

62. Калач, А.В. Моделирование динамики снежных лавин / А.В. Калач, Т.В. Лентяева, А.С. Соловьев // Сборник трудов XXXIII Международной научно-практической конференции «Моделирование технически сложных процессов и систем», Химки, 01 марта 2023 года. – Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, 2023. – С. 12-17.

63. Калач, А.В. Моделирование снежных лавин в пространстве методом динамики частиц / А.В. Калач, Т.В. Лентяева, А.С. Соловьев // Информатика и системы управления. – 2024. – № 3(81). – С. 20-28.

64. Калач, А.В. Модель и алгоритм взаимодействия снежной лавины со строениями / А.В. Калач, А.С. Соловьев, Т.В. Лентяева // Технологии техносферной безопасности. – 2024. – № 1(103). – С. 152-163.

65. Калач, А.В. Обзор программных продуктов для моделирования снеголавинных процессов / А.В. Калач, А.С. Соловьев, Т.В. Лентяева // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», Красноярск, 21 апреля 2023 года. – Железногорск:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий», 2023. – С. 125-128.

66. Калач, А.В. Применение почти-периодического анализа изображений динамики активности циклонов в целях выработки управленческих решений по повышению устойчивости территорий в чрезвычайных ситуациях / А.В. Калач, А.А. Парамонов // Сборник материалов международного круглого стола (в рамках проведения XV Международного салона средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность-2024») «Теория и практика повышения устойчивости урбанизированных территорий в чрезвычайных ситуациях», Конгрессно-выставочный центр «Патриот», г. Кубинка, Московская обл., 30 мая 2024 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2024. – С. 106-112.

67. Камбачокова, М.А. Применение компьютерного моделирования для оценки опасности лавинных процессов / М.А. Камбачокова, Р.А. Байдаев, А.Ш. Кожиков, Т.Ю. Хаширова // Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектива – 2020». В 5 томах, Нальчик, 01-30 апреля 2020 года. Том III. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2020. – С. 139-143.

68. Карпов, С.Л. Модели и алгоритмы взаимодействия снежной лавины со смещаемыми и разрушаемыми препятствиями: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Карпов Сергей Леонидович, 2021. – 176 с.

69. Кисляк, У.А. Исследование снежных лавин при помощи данных спутниковой группировки Sentinel-1 (на примере Гиссаро-Алая) / У.А. Кисляк, Н.А. Костенков, Д.А. Петраков // ГеоРиск. – 2023. – Т. 17, № 3. – С. 34-47. – DOI 10.25296/1997-8669-2023-17-3-34-47.

70. Кисляк, У.А. Исследование снежных лавин с помощью радиолокационных данных спутника Sentinel-1 (на примере Гиссаро-Алая) / У.А. Кисляк, Н.А. Костенков, Д.А. Петраков // Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов. – 2025. – Т. 11, № 1. – С. 106-122.

71. Кисляк, У.А. Методика исследования лавин при помощи снимков Sentinel-1 / У.А. Кисляк, Н.А. Костенков, Д.А. Петраков // Материалы шестой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве», Москва, 25 апреля 2024 года. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. – С. 127-133.

72. Козик, С.М. Расчет движения снежных лавин / С.М. Козик. – Л.: ГИМИЗ. – 1962. – 76 с.

73. Кондратьева, Н.В. Лавинная опасность на территории всесезонного туристско-рекреационного комплекса «Армхи» (Республика Ингушетия) / Н.В. Кондратьева, А.Х. Аджиев, В.В. Разумов, М.Ч. Залиханов, Н.В. Юрченко // ГеоРиск. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 52-61.

74. Котляков, В.М. Геоинформационные технологии в исследованиях окружающей среды / В.М. Котляков, Н.Н. Комедчиков, Т.Е. Хромова // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований», Казань, 19-22 мая 2009 года / ответственные редакторы: Сироткин В.В., Ермолаев О.П.. Том 1. – Казань: Бриг, 2009. – С. 5-9.

75. Котляков, В.М. Что нового мы узнали о снеге и льде в Антарктиде в период Международного геофизического года и в

последующие 10-20 лет / В.М. Котляков // Вопросы географии. – 2020. – № 150. – С. 75-99.

76. Крынецкий, Б. А. Актуальные аспекты прогнозирования чрезвычайных ситуаций, вызванных циклонами методом почти-периодического анализа изображений / А. В. Калач, А. А. Парамонов, Б. А. Крынецкий // Материалы VI всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», Красноярск, 19 апреля 2024 года. – Железногорск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий», 2024. – С. 295-301.

77. Крынецкий, Б. А. Анализ информации о регулярном характере структуры снежной лавины на основе выявления почти периодов / Б. А. Крынецкий, А. В. Калач, А. А. Парамонов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2025. – Т. 17, № 4. – DOI 10.14529/mmph250402. – EDN SNKMEB.

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

79. Крынецкий, Б. А. Исследование лавинной опасности территорий на основе почти периодического анализа спутниковых изображений / А. В. Калач, Б. А. Крынецкий, К. А. Кузнецова // Информатика и системы управления. – 2025. – № 3(85). – С. 117-125. – DOI 10.22250/18142400_2025_85_3_117. – EDN BVGYGQ.

80. Крынецкий, Б. А. К вопросу анализа метеоанных 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. – DOI 10.25257/TTS.2024.3.105.170-180. – EDN HDQEJN.

81. Крынецкий, Б. А. К вопросу о фильтрации данных при исследовании снеголавинных структур / Б. А. Крынецкий, А. В. Калач // Математические методы в технологиях и технике. – 2025. – № 8. – С. 46-50.

82. Крынецкий, Б. А. К вопросу оценки лавинной опасности по результатам почти периодического анализа спутниковых изображений снежного покрова / А. В. Калач, Б. А. Крынецкий, Д. А. Валитова // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы». В 4-х томах, Воронеж, 14-15 мая 2025 года. – Воронеж: ИП Копыльцов П.И., 2025. – С. 489-493.

83. Крынецкий, Б. А. К вопросу структурной сегментации снежных лавин на основе почти периодов / Б. А. Крынецкий, А. В. Калач // Арктика: перспективы, инновации и развитие регионов: IX Международный Арктический саммит : сборник материалов, Москва - Санкт-Петербург, 22-25 апреля 2025 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2025. – С. 191-195.

84. Крынецкий, Б. А. Комплексная визуализация композиций почти периодов в структуре снежной лавины / А. В. Калач, Б. А. Крынецкий, Е. В. Калач, Д. М. Валитова. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025668829.

85. Крынецкий, Б. А. Моделирование и визуализация изменчивости снежного покрова методом почти периодического анализа / А. В. Калач, Б. А. Крынецкий // Вестник Южно-Уральского государственного университета.

Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2025. – Т. 18, № 4. – С. 117-122. – DOI 10.14529/mmp250412. – EDN RARDQQ.

86. Крынецкий, Б. А. Почти периодический анализ нелинейных структур на изображении с использованием полигонального разбиения / К. А. Кузнецова, А. В. Калач, А. А. Парамонов, Т.Е. Смоленцева, Б.А. Крынецкий. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686537.

87. Крынецкий, Б. А. Почти периодический анализ структуры лавиноопасного горного хребта / Б. А. Крынецкий, А. В. Калач // Сборник трудов XXXV Международной научно-практической конференции «Современные проблемы охраны труда и окружающей среды», Химки, 26 февраля 2025 года. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России им. генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, 2025. – С. 164-172.

88. Крынецкий, Б. А. Преобразование данных специального вида, полученных из графических изображений опасных природных явлений / Б. А. Крынецкий, А. В. Калач, А. А. Парамонов // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 02-04 декабря 2024 года. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2025. – С. 901-905.

89. Крынецкий, Б. А. Программа для определения почти-периодов в эмпирических данных с упорядоченным аргументом на основе сдвиговой функции / Б. А. Крынецкий, В. А. Данилова, А. А. Парамонов, Т.Е. Смоленцева, А. В. Калач. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661738.

90. Крынецкий, Б. А. Программа исследования пространственно-временной изменчивости снежного покрова по фотоизображениям / А. В. Калач, Б. А. Крынецкий, Д. М. Валитова, В. А. Данилова. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683455.

91. Крынецкий, Б. А. Программа моделирования снежной лавины методом гидродинамики сглаженных частиц / А. В. Калач, Б. А. Крынецкий, А. С. Соловьев. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683456.

92. Крынецкий, Б. А. Программа моделирования снежной лавины методом гидродинамики сглаженных частиц с применением параллельных вычислений / А. В. Калач, Б. А. Крынецкий, А. С. Соловьев. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685072.

93. Крынецкий, Б. А. Программа моделирования снежных лавин на цифровых картах земного рельефа / А. В. Калач, Б. А. Крынецкий, А. С. Соловьев. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683457.

94. Крынецкий, Б. А. Программа моделирования снежных лавин на цифровых картах рельефа с автоматизированной разметкой на основе почти периодического анализа спутниковых изображений / А. В. Калач, Б. А. Крынецкий, А. С. Соловьев. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025687262.

95. Крынецкий, Б. А. Программа полигонального разбиения изображений с объектами нелинейной структуры / К. А. Кузнецова, А. В. Калач, А. А. Парамонов, Т.Е. Смоленцева, Б.А. Крынецкий // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686539.

96. Крынецкий, Б. А. Программа прогнозирования последствий снежных лавин на основе SPH моделирования с применением почти периодического анализа / Б. А. Крынецкий, А. В. Калач, А. А. Парамонов, Д. М. Валитова // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций», Красноярск, 22-24 октября 2025 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-

спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий», 2025. – С. 150-157.

97. Крынецкий, Б. 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. – EDN ACEALJ.

98. Крынецкий, Б.А. Разработка прогнозно-аналитического комплекса оценки лавинной опасности / Б. А. Крынецкий // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2025. – № 4. – С. 63-67.

99. . Кузьмин, В.И. Почти-периодические функции в методах обработки результатов измерений / В.И. Кузьмин, А.Ф. Гадзаов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 56-61.

100. Левитан Б.М. Некоторые вопросы теории почти-периодических функций / Б. М. Левитан // Успехи матем. наук. – 1947. –Т. II, Вып. 6. – С. 174-214.

101. Левитан Б.М. Обобщённые почти-периодические функции / Б. М. Левитан // Матем. сб. – 1949. –Т. 24 (66). – С. 321-346.

102. Левитан, Б.М. Почти-периодические функции / Б.М. Левитан. - М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1953. – 396 с.

103. Лентяева, Т.В. Обзор программного обеспечения повышения эффективности мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного характера / Т.В. Лентяева, А.В. Калач, А.С. Соловьев // Материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны «Гражданская оборона на страже мира и безопасности». В 5-ти частях, Москва, 01 марта 2024 года. –

Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2024. – С. 205-211.

104. Лентяева, Т.В. Типы и методы прогнозирования лавинной опасности / Т.В. Лентяева, А.С. Соловьев, А.В. Калач // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС», Воронеж, 20 октября 2022 года. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2022. – С. 216-218.

105. Лосев, К.С. Лавины СССР: (Распространение, районирование, возможности прогноза) / Под ред. проф. д-ра геогр. наук В.Л. Шульца и Н.Ф. Дроздовской. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 131 с.

106. Лосев, К.С. По следам лавин / К. С. Лосев // Л: Гидрометеиздат, 1983. – 135 с.

107. Макоклюев, Б.И. Комплекс обработки и анализа метеорологических данных в АО «СО ЕЭС» (АС «Метео») / Б.И. Макоклюев, А.А. Артемьев, А.А. Басов, С.С. Гилева, В.С. Дацко // Энергетик. – 2021. – № 8. – С. 10-14.

108. Малыгин, И.Г. Общая математическая модель обработки данных интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути и Арктической зоны Российской Федерации / И.Г. Малыгин, И.Н. Коновалов, О.А. Королев, В.Т. Васьков // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 3-1(65). – С. 200-204.

109. Малыгин, И.Г. Почти-периодический анализ накопленной энергии тайфунов при исследовании развития чрезвычайных ситуаций, обусловленных активностью тропических циклонов / И.Г. Малыгин, А.В. Калач, А.А. Парамонов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 3(71). – С. 55-62.

110. Махмудов, Ж.К. Современные изменения снежного покрова и динамики лавин на перевале Камчик / Ж.К. Махмудов, Б.Э. Нишонов // Экономика и социум. – 2023. – № 12-1(115). – С. 1236-1242.
111. Медеу, А.Р. 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.
112. Мишин, В.М. Статистический анализ воздействия фазы сизигий (новолуния и полнолуния) на сход лавин и селевых потоков на Северном Кавказе / В.М. Мишин // Евразийское научное обозрение. – 2022. – № 1(5). – С. 94-100.
113. Ноготкова, Ж.В. Современные методы прогнозирования и защиты от снежных лавин / Ж.В. Ноготкова, А.С. Соловьев // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2016. – Т. 2, № 1(7). – С. 311-313.
114. Носенко, Г.А. Возможности мониторинга из космоса опасных гляциальных процессов в труднодоступных горных районах на примере Кармадонской катастрофы 2002 г / Г.А. Носенко, О.В. Рототаева, О.А. Носенко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – Т. 1, № 1. – С. 213-220.
115. Носенко, Г.А. Возможности мониторинга из космоса опасных гляциальных процессов в труднодоступных горных районах (на примере Кармадонской катастрофы 2002 г.) / Г.А. Носенко, О.В. Рототаева, О.А. Носенко // Исследование Земли из космоса. – 2005. – № 1. – С. 75-81.
116. Парамонов, А.А. Модификация математического аппарата почти периодического анализа для обработки пространственно-временных данных с упорядоченным аргументом / А.А. Парамонов, А.В. Калач // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2025. – Т. 17, № 2. – С. 44-49.

117. Парамонов, А.А. О сравнении результатов почти периодического анализа спутниковых видео данных тропических циклонов / А.А. Парамонов // Материалы научно-практической конференции «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций», Красноярск, 24-26 октября 2024 года. – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2025. – С. 198-203.

118. Парамонов, А.А. Применение метрик расстояния сдвиговых функций для почти периодического анализа спутниковых изображений / А.А. Парамонов, А.В. Калач // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемные вопросы моделирования систем и процессов», Воронеж, 14 октября 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 111-117.

119. Парамонов, А.А. Программный комплекс обработки сигналов, представленных нелинейными колебаниями с трендом / А.А. Парамонов, В.И. Кузьмин // Труды XVII Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», Москва, 26-30 июня 2023 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. – С. 265-273.

120. Парамонов, А.А. Современные аспекты анализа больших данных с упорядоченным аргументом / А.А. Парамонов, Т.Е. Смоленцева, А.В. Калач // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 4-6 декабря 2023 г. – Воронеж, 2024. – С. 609-613.

121. Пильгаев, С.В. Комплекс лавинной сигнализации и результаты его испытаний / С.В. Пильгаев, П.А. Черноус, М.В. Филатов [и др.] // сборник докладов III Международного симпозиума «Физика, химия и механика снега», Южно-Сахалинск, 02-06 октября 2017 года. Том Часть 2. – Южно-Сахалинск: Полиграфическая компания «Кано», 2017. – С. 31-36.

122. Подвальный, С. Л. Использование ГИС-систем в качестве инструмента принятия решений по размещению объектов градостроительства / Я.А. Золотухина, О.А. Сотникова, С.Л. Подвальный, Ю.О. Пащенко // Инженерные системы и сооружения. – 2023. – № 2(52). – С. 44-50.

123. Подвальный, С. Л. Математическое моделирование процесса термомеханической деструкции облученных резин / С.Л. Подвальный, А.А. Хвостов, А.В. Карманов, Г.С. Тихомиров, А.П. Попов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16, № 2. – С. 11-17.

124. Подвальный, С. Л. Повышение точности прогнозирования временных рядов с использованием векторного временного кодирования и моделей машинного обучения / С.Л. Подвальный, Н.В. Саввин, Д.Н. Васенин, А.А. Шахова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 3. – С. 35-42.

125. Подвальный, С.Л. Актуальные вопросы информационных технологий и телекоммуникаций / С.Л. Подвальный, С.А. Малюкова // Инженерные технологии. – 2024. – № 2(6). – С. 54-63.

126. Подрезов, Ю.В. Особенности прогнозирования лавинной опасности на территории российской федерации / Ю.В. Подрезов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2020. – № 1. – С. 88-93.

127. Резников, К.Г. Разработка программного обеспечения для визуализации процессов полимеризации / К.Г. Резников, С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 7-14.

128. Семакова, Э. Р. Опыт использования данных Sentinel-1 в задачах идентификации снежных лавин на космоснимках / Э.Р. Семакова, М.Г. Поторжинский, Е.И. Сиетиня, В.П. Сафронов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 4, № 1. – С. 200-204.

129. Семакова, Э.Р. Многолетние изменения снеголавинных показателей в районах перевала Камчик и урочища Чимган (Западный Тянь-Шань) / Э.Р. Семакова, В.П. Сафронов, А.С. Попов // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2022. – Т. 4, № 3. – С. 267-275.

130. Семакова, Э.Р. О возможности использования геоинформационных систем для оценки пространственного распределения частоты формирования лавин / Э.Р. Семакова, С.И. Климов // Гео-Сибирь. – 2010. – Т. 1, № 2. – С. 75-79.

131. Семакова, Э.Р. Оценка лавинной и селевой опасности небольших горных бассейнов Узбекистана на основе численного моделирования в программе RAMMS / Э.Р. Семакова, А.С. Попов, В. Сафронов [и др.] // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», Иркутск, 05-07 июля 2019 года. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 2019. – С. 361-369.

132. Семакова, Э.Р. Предварительные результаты к созданию методических рекомендаций по мониторингу снежных лавин в отрогах Западного Тянь-Шаня на основе использования снимков Sentinel-1 / Э.Р. Семакова, М.Г. Поторжинский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 1. – С. 343-347.

133. Семакова, Э.Р. Применение ГИС-технологий в снеголавинных исследованиях / Э.Р. Семакова // Гео-Сибирь. – 2007. – Т. 1, № 1. – С. 190-193.

134. Семакова, Э.Р. Современная методика составления среднемасштабных карт лавинной опасности / Э.Р. Семакова // Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 4. – С. 88-90.

135. Семакова, Э.Р. Предварительные результаты к созданию методических рекомендаций по мониторингу снежных лавин в отрогах

Западного Тянь-Шаня на основе использования снимков Sentinel-1 / Э.Р. Семакова, М.Г. Поторжинский // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 13-17 ноября 2023 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2023. – С. 105.

136. Соколова, Д.П. Оценка динамических характеристик селевого потока по видеоматериалам / Д.П. Соколова, В.А. Куровская, А.А. Остапов, Н.А. Казаков // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 31-51.

137. Соловьев, А.С. Моделирование схода снежной лавины по заданным географическим координатам / А.С. Соловьев, А.В. Калач, С.Л. Карпов // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – № 2(48). – С. 15.

138. Соловьев, А.С. Некоторые закономерности схода снежных лавин на горных склонах различной формы / А.С. Соловьев, А.В. Калач, С.Л. Карпов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 38-40.

139. Соловьев, А.С. Особенности схода снежной лавины на выпуклых и вогнутых склонах / А.С. Соловьев, А.В. Калач, С.Л. Карпов, В.И. Савинова // Технологии гражданской безопасности. – 2013. – Т. 10, № 1(35). – С. 84-90.

140. Соловьев, А.С. 3D-визуализация модели динамики снежной массы / А.С. Соловьев, А.В. Калач, Т.В. Лентяева // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2022. – № 3. – С. 121-126.

141. Соловьев, А.С. Исследование особенностей рельефа горного склона на разрушительное воздействие снежных лавин с применением имитационного моделирования / А.С. Соловьев, А.В. Калач, Е.В. Калач // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 846-849.

142. Соловьев, А.С. К вопросу трехмерного моделирования снежных лавин / А.С. Соловьев, А.В. Калач, Т.В. Лентяева // сборник трудов

Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 12-14 декабря 2022 года / Воронежский государственный университет. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2023. – С. 642-646.

143. Соловьев, А.С. Математическое моделирование чрезвычайных ситуаций, связанных с зарождением и сходом снежных лавин: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Соловьев Александр Семенович. – Воронеж, 2014. – 22 с.

144. Соловьев, А.С. Моделирование движения лавиноопасной снежной массы / А.С. Соловьев, А.В. Калач, С.Л. Карпов // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 13-15 декабря 2021 года. – Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью «Вэлборн», 2022. – С. 755-759.

145. Соловьев, А.С. Моделирование динамики снежных лавин / А.С. Соловьев, А.В. Калач. – Иваново: ИПК «ПресСто», 2022. – 160 с.

146. Соловьев, А.С. Моделирование силового воздействия снежной лавины на здания и сооружения / А.С. Соловьев, А.В. Калач, Т.В. Лентяева // Информатика и системы управления. – 2024. – № 1(79). – С. 14-24.

147. Соловьев, А.С. О современном состоянии трехмерного моделирования снежных лавин / А.С. Соловьев, А.В. Калач, Т.В. Лентяева // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», Воронеж, 04-06 декабря 2023 года. – Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью «Вэлборн», Издательство «Научно-исследовательские публикации», 2024. – С. 675-679.

148. Соловьев, А.С. Пространственное моделирование движения лавиноопасной снежной массы на основе уравнений динамики

поступательного движения / А.С. Соловьев, А.В. Калач // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2021. – № 4/1. – С. 27-34.

149. Солодянкина, А.А. Отечественный опыт классификации лавин при защите автомобильных дорог / А.А. Солодянкина, М.О. Карпушко // Химия. Экология. Урбанистика. – 2023. – Т. 2. – С. 295-299.

150. Солодянкина, А.А. Методы защиты горных дорог от лавинной опасности / А.А. Солодянкина, М.О. Карпушко // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2022. – Т. 1. – С. 287-290.

151. Суханов, Л.А. Вероятностное зонирование лавиносборов как инструмент мониторинга климата / Л.А. Суханов // XIII Гляциол. симпозиум «Сокращение гляциосферы: факты и анализ». – СПб, 2004. – С. 126–127.

152. Суханов, Л.А. Прогнозирование предельных границ многократных стихийных бедствий на примере вероятностного зонирования лавиносборов. / Л.А. Суханов // Вторая науч.практич. конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». – МЧС России : Доклады и выступления. –М., 2003. – С. 221–227.

153. Суханов, Л.А. Физическое моделирование снежных лавин гранулированными материалами / Л.А. Суханов // Материалы гляциологических исследований. – 2004. – Вып. 94. – С. 77-86.

154. Турчанинова, А.С. К вопросу моделирования снежных лавин при недостаточности данных / А.С. Турчанинова, С.А. Сократов, Ю.Г. Селиверстов, Д.А. Петраков, А.В. Лазарев // ГеоРиск. – 2020. – Т. 14, № 1. – С. 38-47.

155. Турчанинова, А.С. К вопросу оценки лавинной опасности при территориальном планировании / Е.Д. Жукова, Н.А. Гинзбург, А.С. Турчанинова, Д.А. Петраков // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии: Коллективная монография / Научный редактор В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: Геофизический

институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, 2022. – С. 264-268.

156. Турчанинова, А.С. Лавинная активность в России в условиях изменяющегося климата / А.С. Турчанинова, С.А. Сократов, Ю.Г. Селиверстов, А.Ю. Комаров // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. – 2022. – № 3-4(115-116). – С. 122-131.

157. Турчанинова, А.С. Определение зон зарождения и оценка динамических характеристик снежных лавин: специальность 25.00.31 «Гляциология и криология Земли»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Турчанинова Алла Сергеевна. – Москва, 2013. – 24 с.

158. Турчанинова, А.С. Сравнительный анализ методик расчета динамических параметров снежных лавин при проведении инженерных изысканий / А.С. Турчанинова // ГеоРиск. – 2012. – № 2. – С. 32-39.

159. Тушинский, Г.К. Ледники, снежники, лавины Советского Союза / Г.К. Тушинский. – М., Географгиз, 1963. – 312 с.

160. Хайирбеков, Ш.Х. Подавление шумов и фильтрация при обработке изображений капельных и волновых течений / Ш.Х. Хайирбеков // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2024. – Т. 25, № 2. – С. 50-63.

161. Хаустов, И.А. Методология структурно-параметрического синтеза информационного обеспечения систем анализа и управления качеством на примерах объектов пищевой и химической промышленности / И.А. Хаустов, Д.С. Карпович // Материалы V Международной научно-практической конференции «Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса» в рамках реализации Ассоциации «Технологическая платформа «Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания», Воронеж, 21 мая 2021 года / Воронеж. гос. ун-

т инж. технол.. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2021. – С. 41-46.

162. Хаустов, И.А. Проблемно-ориентированные системы анализа и управления качеством в периодических процессах синтеза полимеров: специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Хаустов Игорь Анатольевич. – Тамбов, 2016. – 379 с.

163. Черноус, П.А. Мониторинг характеристик, влияющих на сход лавин. Состояние, возможности и проблемы / П.А. Черноус // Экологические системы и приборы. – 2021. – № 11. – С. 69-77.

164. Черноус, П.А. Некоторые результаты оценки пространственной изменчивости высоты снежного покрова на склонах Хибин / П.А. Черноус, Н.О. Михайленко // Материалы V Байкальской международной научной конференции - стратегической сессии «Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли», Иркутск, 19-23 июня 2023 года. – Иркутск: Репроцентр А1, 2023. – С. 94-100.

165. Черноус, П.А. О точности оценок характеристик лавинной опасности при инженерных изысканиях для строительства / П.А. Черноус // Материалы Общероссийской научно-практической конференции «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях», Москва, 18 марта 2022 года. – Москва: Геомаркетинг, 2022. – С. 90-97.

166. Черноус, П.А. Опыт предупредительного спуска лавин в Хибинах. Проблемы и перспективы / П.А. Черноус // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 8. – С. 14-25.

167. Черноус, П.А. Предотвращение ущерба от снежных лавин в России. Научные и практические проблемы / П.А. Черноус // Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной 150-

летию Михаила Ивановича Сумгина «Природные опасности: связь науки и практики», Саранск, 18-19 мая 2023 года. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2023. – С. 301-307.

168. Черноус, П.А. О надежности оценок лавинной опасности / П.А. Черноус // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен», Санкт-Петербург, 05-14 октября 2023 года. – Санкт-Петербург: ООО «Издательство ВВМ», 2023. – С. 660-665.

169. Четырбоцкий, А.Н. Численное моделирование динамики схода лавины гибридными методами SPH / А.Н. Четырбоцкий // Материалы IV Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», Иркутск, 06-10 сентября 2016 года. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. – С. 248-250.

170. Шутеев, С.А. Физические принципы метода измерения трехмерных координат объектов в реальном времени / С.А. Шутеев // Сборник рефератов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Серия 16: 29. Физика. 30. Механика. 41. Астрономия. 89. Космические исследования. – 2006. – № 5. – С. 22.

171. Bansal, J.K. Snow avalanche in the Indian Himalayas: Hazard zonation and climate change trends in Kullu region of Himachal Pradesh, India / J.K. Bansal, A. Goswami, R.A. Snehmani // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. – 2025. – V. 138, 103882.

172. Bartelt, P. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining / Bartelt P., B. Salm and U. Gruber // Journal of Glaciology. – 1999. – V. 45, No. 150. – P. 242-254.

173. Bartelt, P. Modeling mass-dependent flow regime transitions to predict the stopping and depositional behavior of snow avalanches / P. Bartelt, Y.

Bühler, O. Buser, M. Christen, L. Meier // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. –2012. –Issue F1. – P. 1–117.

174. Bartelt, P., A numerical model for snow avalanches in research and practice / P. Bartelt, Y. Bühler, M. Christen, Y. Deubelbeiss, M. Salz, M. Schneider, L. Schumacher // *RAMMS user manual v. 1.7.0 Avalanche*. WSL/SLF, Davos, Switzerland, 2017.

175. Bozhinskiy, A. N. Avalanches: A probabilistic approach to modelling / A. N. Bozhinskiy, A. N. Nazarov, P. A. Chernouss // *Annals of Glaciology*. – 2001. – V. 32. – P. 255-258.

176. Bozhinskiy, A. N. The Monte Carlo simulation of avalanche-type processes / A. N. Bozhinskiy // *Annals of Glaciology*. – 2004. – V. 38. – P. 351-356.

177. Cheng, T. T., and Perla, R. 1. 1979. Numerical computation of avalanche motion. Ottawa, Environment Canada. Inland Waters Directorate. National Hydrology Research Institute. (NHRI Paper No. 5.)

178. Choubin B. Snow avalanche hazard prediction using machine learning methods / B. Choubin, M. Borji, A. Mosavi, F. Sajedi-Hosseini, V. P. Singh, Sh. Shamshirband // *Journal of Hydrology*. – 2019. – V. 577. – 123929.

179. Christen, M. AVAL-1D: an avalanche dynamics program for the practice / M. Christen, P. Bartelt, U. Gruber // *Proceedings of the International Congress «Interpraevent 2002 in the Pacific Rim»*. Matsumoto, Japan, 2002. – V. 2. – P. 715–725.

180. Christen, M. RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanche in three-dimensional terrain / M. Christen, J. Kowalski, P. Bartelt // *Cold Regions Science and Technology*. – 2010. – V. 63. – P. 1–14.

181. Granig, M. Experiences in avalanche assessment with the powder snow avalanche model SamosAT / Granig, M., Sampl, P., Tollinger, C., Jörg, Ph // Accepted for the International Snow Science Workshop 2009, Davos, Switzerland.

182. Laatsch, W. Faktoren der Wald- und Bodenzerstörung durch Schnee in den Alpen / Laatsch, W., Baum U. // *Geoderma*. – 1971. – V. 20. – P. 324–333.
183. Methods for prediction of the avalanche danger / A. V. Kalach, A. S. Solovyov, S. L. Karpov // *Journal of Physics: Conference Series: Current Problems, Voronezh, 07-09 December 2020*. – Voronezh, 2021. – P. 012071.
184. Salm, B. Contribution to avalanche dynamics. International Association of Scientific Hydrology Publication 69 // *Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches: Symposium in Davos 1965*. Wallingford: IAHS Press, 1966. P. 199–214.
185. Schweizer, J. Review of spatial variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation / J. Schweizer, K. Kronholm, J.B. Jamieson, K.W. Birkeland // *Cold Regions Science and Technology*. – 2008. – V. 51, I. 2-3. – P. 253–272.
186. Voellmy, A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen / A. Voellmy // *Schweiz Bauzeitung*. – 1955. – V. 73, N 12. – P. 159–162.
187. Wawra, M. Numerical modelling of snow avalanches: Interaction between granular flow and Obstruction / M. Wawra // *Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Universität für Bodenkultur Wien: Wien*. – 2010. – 109 P.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2024688033

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2024688033 Дата регистрации: 25.11.2024 Номер и дата поступления заявки: 2024686537 05.11.2024 Дата публикации и номер бюллетеня: 25.11.2024 Бюл. № 12 Контактные реквизиты: a_kalach@mail.ru	Автор(ы): Кузнецова Карина Андреевна (RU), Калач Андрей Владимирович (RU), Парамонов Александр Александрович (RU), Смоленцева Татьяна Евгеньевна (RU), Крынецкий Борис Александрович (RU) Правообладатель(и): федеральное казенное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский институт ФСИН России» (RU)
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Название программы для ЭВМ:
«Почти периодический анализ нелинейных структур на изображении с использованием полигонального разбиения»

Реферат:

Программа позволяет создавать сеть с настраиваемой частотой узлов сетки. Для возможности линеаризации исследуемого объекта захваченный сеткой фрагмент изображения преобразуется при помощи билинейной интерполяции. Затем полученный фрагмент изображения анализируется на наличие почти периодических структур как вдоль, так и поперёк изображения. Найденные значения рубежей отображаются на исходных данных. Данная программа позволяет по-новому анализировать такие нелинейные процессы, как траектории схода лавин или структуру тайфунов с использованием аппарата почти периодического анализа. Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК; ОС: Windows.

Язык программирования: Python
Объем программы для ЭВМ: 861 КБ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2024688034	Автор(ы): Кузнецова Карина Андреевна (RU), Калач Андрей Владимирович (RU), Парамонов Александр Александрович (RU), Смоленцева Татьяна Евгеньевна (RU), Крынецкий Борис Александрович (RU)
Дата регистрации: 25.11.2024	Правообладатель(и): федеральное казенное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский институт ФСИН России» (RU)
Номер и дата поступления заявки: 2024686539 05.11.2024	
Дата публикации и номер бюллетеня: 25.11.2024 Бюл. № 12	
Контактные реквизиты: a_kalach@mail.ru	

Название программы для ЭВМ:
«Программа полигонального разбиения изображений с объектами нелинейной структуры»

Реферат:

Программа позволяет создавать сеть, задающуюся координатами узлов. Для возможности линеаризации исследуемого объекта, захваченный сеткой фрагмент изображения преобразуется при помощи билинейной интерполяции. Полигоны сети являются нестроговыми, могут быть, как структурно равными, так и разнокалиберными. Данная программа позволяет по-новому анализировать такие нелинейные процессы, как траектории схода лавин или структуру тайфунов. Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК; ОС: Windows.

Язык программирования: Python
Объем программы для ЭВМ: 500 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2025668829

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2025668829

Дата регистрации: 18.07.2025

Номер и дата поступления заявки:
2025667001 04.07.2025

Дата публикации и номер бюллетеня:
18.07.2025 Бюл. № 7

Контактные реквизиты:
a_kalach@mail.ru

Автор(ы):

Калач Андрей Владимирович (RU),

Крынецкий Борис Алексеевич (RU),

Калач Елена Владимировна (RU),

Валитова Диана Марсовна (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное казенное образовательное

учреждение высшего образования «Воронежский

институт Федеральной службы исполнения

наказаний» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Комплексная визуализация композиций почти периодов в структуре снежной лавины

Реферат:

Программа предназначена для визуализации результатов, полученных в ходе почти периодического анализа структур лавин, на разных представлениях анализируемых данных - на линейризованном представлении, на исходном изображении. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows.

Язык программирования: Python 3.11

Объем программы для ЭВМ: 160 КБ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2025683455

Дата регистрации: 03.09.2025

Номер и дата поступления заявки:
2025682375 25.08.2025

Дата публикации и номер бюллетеня:
03.09.2025 Бюл. № 9

Контактные реквизиты:
a_kalach@mail.ru

Автор(ы):

Калач Андрей Владимирович (RU),

Крынецкий Борис Алексеевич (RU),

Валитова Диана Марсовна (RU),

Данилова Виктория Алексеевна (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное казённое образовательное

учреждение высшего образования «Воронежский

институт Федеральной службы исполнения

наказаний» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа исследования пространственно-временной изменчивости снежного покрова по фотоизображениям

Реферат:

Программа предназначена для определения пространственно-временной изменчивости снежного покрова по фотоизображениям. Программа позволяет распознавать и классифицировать 3 типа изменений положения снежных масс - осыпавшийся снег, оголённое лавиной место, след лавины. Программа позволяет распознавать множественные объекты и приводить мультиклассовые оценки с целью повышения оперативности мониторинга опасных природных явлений. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК, ОС: Windows.

Язык программирования: Python 3.11

Объем программы для ЭВМ: 11 КБ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2025689098	Авторы: Калач Андрей Владимирович (RU), Крынецкий Борис Алексеевич (RU), Соловьев Александр Семенович (RU)
Дата регистрации: 24.10.2025	Правообладатель: ФЕДЕРАЛЬНОЕ КАЗЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "ВОРОНЕЖСКИЙ ИНСТИТУТ ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ИСПОЛНЕНИЯ НАКАЗАНИЙ" (RU)
Номер и дата поступления заявки: 2025687262 13.10.2025	
Дата публикации и номер бюллетеня: 24.10.2025 Бюл. № 11	
Контактные реквизиты: нет	

Название программы для ЭВМ:

Программа моделирования снежных лавин на цифровых картах рельефа с автоматизированной разметкой на основе почти периодического анализа спутниковых изображений

Реферат:

Программа предназначена для моделирования и анализа движения частиц на цифровой модели рельефа территорий, отображаемых на аэрофотоснимках. Программа позволяет проводить преобразования данных для синхронизации масштабов разнородных наборов данных. Программа способна в автоматизированном режиме формировать системы критических границ, определяющих степень лавинной опасности. На основе выявленных границ программа способна проводить генерацию распределений начальных состояний частиц специальной формы. Программа позволяет проводить комплексные визуализации распределений частиц в пространстве. Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК. ОС: Windows.

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 24,8 КБ

Общество с ограниченной ответственностью «АЙТИ КЛАСС»

ИНН 5003167092 КПП 500301001
Российская Федерация, 123007, г. Москва, Хорошёвское шоссе, 32А

Исх. № КЛ 785/25
На № от



АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования Крынецкого Бориса Алексеевича «Методы обработки и интерпретации пространственно-временных данных мониторинга лавинной опасности»

Комиссия в составе председателя – директора по продукту Бексаева Николая Сергеевича; членов комиссии: аналитика данных Кончевского Артема Игоревича, системного аналитика Новосельцевой Екатерины Александровны, настоящим актом подтверждает использование результатов диссертации Крынецкого Бориса Алексеевича в практике аналитической деятельности ООО «АЙТИ КЛАСС».

Разработанные Крынецким Б.А. компьютерный метод обработки, симметричной трансформации и анализа пространственно-временных данных о снежном покрове на основе локальных полигональных аппроксимаций, алгоритм поддержки принятия решений, позволяющий проводить оценку лавинной опасности на основе метода почти периодического анализа пространственно-временных данных о снежном покрове и его программная реализация используются в практике аналитической деятельности ООО «АЙТИ КЛАСС» в отделе аналитики департамента проектов В2С для решения задач оценки рисков.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:

 Бексаев Н. С.
 Кончевский А. И.
 Новосельцева Е. А.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

В.Ю. Мизин

доктор технических наук, профессор



А.В. Тимошенко

января 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
КРЫНЕЦКОГО БОРИСА АЛЕКСЕЕВИЧА

«Методы обработки и интерпретации пространственно-временных данных мониторинга лавинной опасности», выполненного на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», в образовательную деятельность Института информационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Комиссия в составе председателя – и.о. директора Института информационных технологий, кандидата технических наук Уланского А.Б.; членов комиссии: заведующего кафедрой прикладной математики, доктора технических наук, доцента Саратовой Т.Е.; заведующего кафедрой инструментального и прикладного программного обеспечения, кандидата технических наук, доцента Болбакова Р.Г., настоящим актом подтверждает использование результатов диссертации Крынецкого Б.А. в образовательном процессе Института информационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет».

Полученные в рамках диссертации Крынецкого Б.А. результаты:

– компьютерный метод обработки, симметричной трансформации и анализа пространственно-временных данных о снежном покрове на основе локальных полигональных аппроксимаций, позволяющий выявлять лавинную опасность;

– алгоритм поддержки принятия решений, позволяющий проводить оценку лавинной опасности на основе метода почти периодического анализа пространственно-временных данных о снежном покрове и его программная реализация;

– критерии, модель описания и оценки эффективности поддержки принятия решений на основе метода почти периодического анализа пространственно-временных данных о снежном покрове, позволяющие обеспечивать объективный мониторинг лавинной опасности; используются при проведении практических занятий по дисциплинам «Методы анализа данных», «Прикладные задачи математической статистики», «Моделирование динамических систем» профиля «Управление данными» направления подготовки 09.03.03 «Прикладная информатика» и профиля «Анализ данных» направления подготовки 01.03.04 «Прикладная математика».

Председатель комиссии:
И.о. директора Института информационных технологий, кандидат технических наук

А.Б. Уланский

Члены комиссии:
заведующий кафедрой прикладной математики,
доктор технических наук, доцент

Т.Е. Саратова

заведующий кафедрой инструментального
и прикладного программного обеспечения,
кандидат технических наук, доцент

Р.Г. Болбаков