

К вопросу о визуализации почти периодической структуры снежной лавины

Б.А. Крынецкий^{1,A}, А.В. Калач^{2,A,B}, А.А. Парамонов^{3,A}

^A МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

^B Воронежский институт ФЦИН России, Воронеж, Россия

¹ ORCID: 0000-0003-0789-5233, kryneckij@mirea.ru

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

³ ORCID: 0000-0002-8504-2108, paramonov_a_a99@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается специфика интерпретации результатов почти периодического анализа в задаче структурной сегментации снежной лавины, применимой для повышения эффективности прогнозных моделей и совершенствования противополавиновых мероприятий. Предварительный этап линеаризации структуры лавины опирается на полигональную аппроксимацию области тела явления, представляя данные в прямоугольном формате. Исследование спрямленных данных позволяет сформировать сеть равномерных прямоугольных областей единообразного характера данных, для которой возникает задача отображения разметки на исходные данные. Такая разметка позволяет наглядно разделить области ламинарного и турбулентного схода лавины, а так же выделить существенные границы областей начала, развития и торможения снежной массы. В статье приводится математическое и алгоритмическое обеспечение, необходимые для воспроизведения продольных и поперечных границ на исходных данных для последовательностей полигонов произвольной длительности. Результаты могут быть применимы при разработке систем визуализации, предупреждения и предотвращения лавинной активности, тем самым стимулируя усиление эффективности мер предотвращения ущерба от опасных природных явлений.

Ключевые слова: почти периодический анализ, анализ данных, обработка изображений, лавины, опасные природные явления, визуализация, полигональная трансформация.

1. Введение

Современные климатические тренды сопровождаются учащением чрезвычайных ситуаций, связанных с опасными природными явлениями, среди которых выделяют лавины. Лавины, распространены во множестве стран – в России, Казахстане, Таджикистане и других. Их активность носит разрушительный характер, что и обуславливает существенный интерес к прогнозированию [1-3].

В рамках анализа лавины исследуются как механизмы возникновения лавин, так и механизмы взаимодействия снежной массы с инфраструктурой [4, 5].

Важным этапом исследования является визуализация модели – для этого применяются специализированные программы и аналитические комплексы [6].

Визуализация модели явления позволяет эффективно решать задачи сегментации явления, что может улучшать результаты аналитических моделей – так модель RAMMS демонстрирует удовлетворительные результаты даже в условиях недостатка данных [7, 8].

При этом существенную роль в анализе сыграло зонирование по степеням опасности. Таким образом, вопрос о структурной сегментации лавины показывает свою актуальность в целях улучшения качества прогнозных моделей.

Среди прочих моделей анализа для качественного исследования данных, обладающих упорядоченным аргументом, можно выделить модель почти периодического анализа, основанного на обобщённой сдвиговой функции. Его применение в задаче сегментации опасного природного явления на примере тропических циклонов показало высокую эффективность [9].

Почти периодический анализ представляет собой математический аппарат исследования эмпирических данных, представленных упорядоченными по равномерному аргументу записями функции $y(t)$. Для выявления величин характерных интервалов единообразного поведения данных, называемых почти периодами, для набора значений функции $y(t)$ рассчитываются значения обобщённой сдвиговой функции (1):

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

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

Локальные минимумы полученной функции, анализируются при различных значениях аргумента Δt и выделяются наиболее значимые и совпадающие, являющиеся почти периодами для исследуемого набора значений. Результаты обработки обобщённых сдвиговых функций для всех строк и столбцов изображения обобщаются и выделяются наиболее встречаемые значения почти периодов, которые характеризуют исследуемое состояние структуры лавины на изображении.

Предлагается подход к визуализации результатов почти периодического анализа, применяемого к графическим данным о снежной лавине.

2. Почти периодический анализ в задаче структурной сегментации лавины

В ходе обработки изображений опасных природных явлений таких, как сходы лавин, могут применяться различные методы анализа, преследующие свои цели. Одной из задач, решаемой в этой области, является структурная сегментация лавины, предполагающая выявление характерных частей, точек, линий и границ областей стабильного поведения. Для решения подобной задачи можно применять почти периодический анализ, основанный на выделении ритмичных характеристик, описывающих интервалы единообразного поведения данных.

Почти периодический анализ возможно проводить как в отношении данных исходного изображения, так и в обработанной области. Так, рациональным решением представляется локализация области тела явления на всём изображении, и приведение данных к спрямлённому виду. Для этого может применяться алгоритм полигональной линеаризации, приводящий структуры лавин произвольной формы к прямоугольному виду, в котором появляется возможность проведения почти периодического анализа в отношении горизонтальных и вертикальных сечений.

Результаты почти периодического анализа представляли в виде ритмических тактов, определяющих интервалы единообразного поведения функции с упорядоченным аргументом.

В рамках исследования линеаризованных данных почти периоды определяли структурную разметку системы на секторы прямоугольной формы.

Для практической реализации результатов осуществляли описание алгоритма, формирующего воспроизведение структурной разметки выявленных границ на исследуемых данных.

3. Математическое обеспечение алгоритма

В ходе проведения почти периодического анализа структуры лавины в линеаризованных координатах полигоны образуют аппроксимирующую сеть, описывающую геометрическую специфику явления.

Рассмотрим основной подход, использованный, 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 $\left(x_3 + i \cdot \frac{x_4 - x_3}{N}, y_3 + i \cdot \frac{y_4 - y_3}{N}\right)$.

Так, для полигона с числом поперечных делений 7, граница под номером 4 приводится пунктирной линией на рис.1.

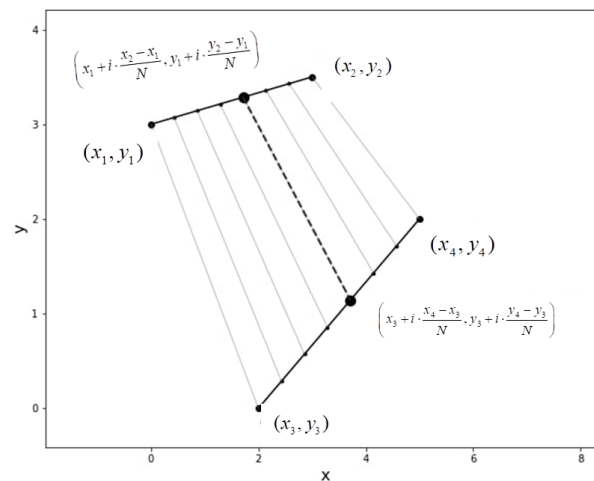


Рис.1. Воспроизведение продольной границы в полигоне

Таким образом, для проведения продольных границ структурной сегментации в каждом полигоне последовательно проводятся i -ые отрезки. Так, пример 8-ой продольной границы для деления изображения на 10 полос приводится на рис. 2.

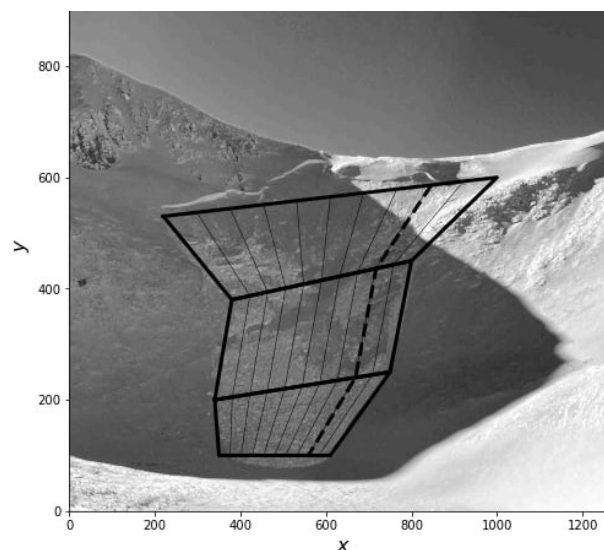


Рис.2 Воспроизведение продольной границы в системе полигонов в пространстве исследуемого изображения

В случае построения поперечных границ отрезков 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, 2-ая граница для 7 продольных секторов внутри полигона приводится пунктирной линией на рис. 3.

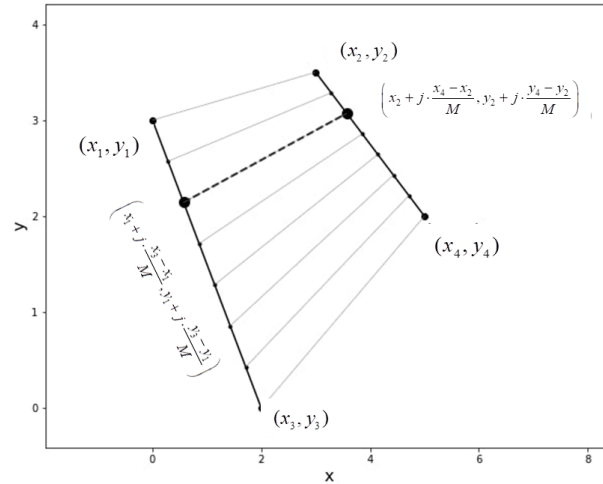


Рис.3 Воспроизведение поперечной границы в полигоне

Для воспроизведения j -ой поперечной границы в структуре последовательности полигонов с продольными частотами дискретизации K_i требуется определить номер полигона p на основе неравенства $\sum_{i=0}^{p-1} K_i < j \leq \sum_{i=0}^p K_i$.

Тогда в p -ом полигоне с частотой дискретизации K_p проводится $\left(j - \sum_{i=0}^{p-1} K_i\right)$ -ый срез.

Так, в качестве примера вид 8-ой поперечной границы приведен пунктирной линией на рис. 4.

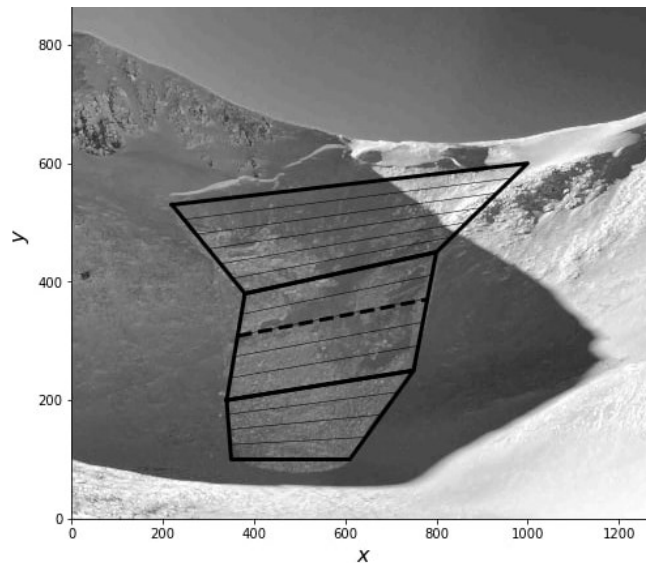


Рис. 4 Воспроизведение продольной границы в системе полигонов в пространстве исследуемого изображения

Для эффективной обработки наборов данных, представленных в виде векторов и матриц, применялась библиотека NumPy.

Реализация программы на языке программирования Python обеспечивает кросс-платформенность – возможность развертки и применения в основных операционных системах публичного применения (Windows, Linux, macOS).

В рамках разработанной программы пользователь способен формировать аппроксимирующие полигональные представления обрабатываемой области изображения, задавать частоты продольной и поперечной дискретизации, а так же выбирать почти периоды, отображаемые в системе полигонов на основе приведенного в работе алгоритма.

Пример реализации алгоритма на изображении лавины для сетки из 3 полигонов 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 приведено пунктирными линиями на рис 6.

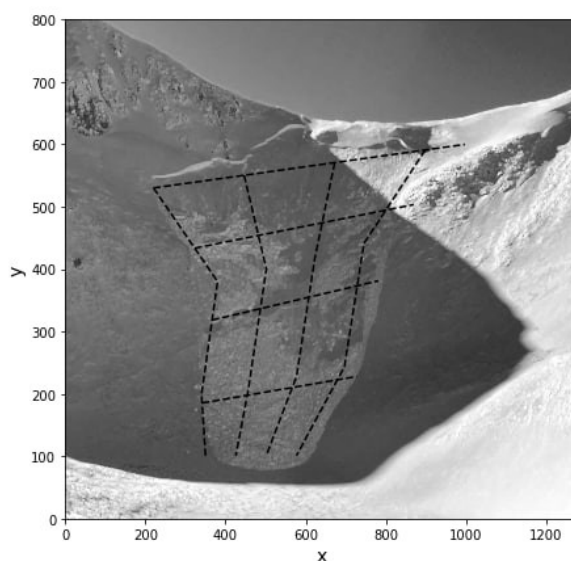


Рис. 6 Структурная сегментация исследуемой снежной лавины

Следует отметить, что на рис. 6 хорошо видно, как в результате использования разработанного алгоритма структурной сегментации разделяют границы областей ламинарного и турбулентного характера снежной лавины. В явном виде фиксировали разделение продольными границами на три сегмента, воспроизводящих сходы лавины от двух гребней и слияние этих потоков посередине. Поперечные границы отсекают такт старта схода, интервал изгиба движения и окончательный период торможения лавины.

Полученные результаты позволяют прогнозировать лавинную активность для обеспечения устойчивого и качественного развития инфраструктуры регионов и поддержки принятия решений при проектировании противолавинных сооружений.

5. Заключение

Разработан алгоритм воспроизведения ритмичной структурной сегментации границ областей ламинарного и турбулентного характера снежной лавины. Приводится математическое основание для визуализации границ в единичных полигонах, а так же алгоритм, реализующий системный подход к построению продольных и поперечных границ в системах линеаризующих полигонов.

На графических примерах продемонстрированы возможности построения единичных продольных и поперечных границ на исходных данных, а также их почти периодической системы пространственного структурирования.

Полученные результаты могут быть полезны в повышении точности моделей прогнозирования лавинной активности, а также в задачах проектирования противолавинных сооружений для минимизации ущерба населению и инфраструктуре.

Список литературы

1. Саидов, М. С. Состояние картографирования лавин в Таджикистане: лавиннообразующие факторы и краткий обзор методов прогноза снежных лавин / М. С. Саидов // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. – 2024. – Т. 1, № 1(37). – С. 125-133. – EDN GXNWPE.
2. Быков, Н. И. Дендрохронологический анализ снежных лавин Алтая / Н. И. Быков, Н. В. Рыгалова, А. А. Шигимага // Фундаментальная география в Сибири: этапы развития, результаты и перспективы : Материалы Международной научной конференции, посвящается памяти выдающихся географов: 95-летию со дня рождения Владимира Васильевича Воробьева, 85-летию со дня рождения Валериана Афанасьевича Снытко, 75-летию со дня рождения Александра Николаевича Антипова, Иркутск, 27–30 ноября 2024 года. – Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2024. – С. 283-285. – EDN GCDQTU.
3. Геоинформационные исследования для мониторинга снежных лавин в Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан / О. А. Петрова, Г. К. Даумова, Н. Ф. Денисова [и др.] // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2024. – Т. 30, № 1. – С. 545-555. – DOI 10.35595/2414-9179-2024-1-30-545-555. – EDN FSBVCY.
4. Черниченко, Е. И. Снежные лавины - особенности образования / Е. И. Черниченко // Рациональное использование природных ресурсов в целях устойчивого развития : Материалы III межрегиональной конференции обучающихся учреждений среднего общего, среднего профессионального и высшего образования, проводимой при поддержке Красноярского краевого фонда науки, Красноярск, 16–18 октября 2024 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2024. – С. 164-167. – EDN KPKQON.
5. 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. – DOI 10.25257/TTS.2024.1.103.152-163. – EDN ALXLFY.
6. Лентяева, Т. В. Программная реализация трехмерной модели динамики снежной массы / Т. В. Лентяева // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2023. – № 3. – С. 104-111. – EDN PWQYLY.
7. К вопросу моделирования снежных лавин при недостаточности данных / А. С. Турчанинова, С. А. Сократов, Ю. Г. Селиверстов [и др.] // ГеоРиск. – 2020. – Т. 14, № 1. – С. 38-47. – DOI 10.25296/1997-8669-2020-14-1-38-47. – EDN GCDUTN.
8. Жукова, Е. Д. Оценка и учет лавинной опасности при развитии курортов (на примере Красной Поляны) / Е. Д. Жукова // Инженерные изыскания в строительстве : Материалы четвертой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов, Москва, 29 апреля 2022 года. – Москва: Геомаркетинг, 2022. – С. 134-139. – EDN PPRSCG.
9. 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 // Теория и практика повышения устойчивости урбанизированных территорий в чрезвычайных ситуациях : Сборник материалов международного круглого стола (в рамках проведения XV Международного салона средств обеспечения безопасности "Комплексная безопасность-2024"), 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. – EDN UUIGZQ.

On the Issue of Visualization of the Almost Periodic Structure of a Snow Avalanche

B.A. Krynecky^{1,A}, A.V. Kalach^{2,A,B}, A.A. Paramonov^{3,A}

^A MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

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

¹ ORCID: 0000-0003-0789-5233, kryneckij@mirea.ru

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

³ ORCID: 0000-0002-8504-2108, paramonov_a_a99@mail.ru

Abstract

The article considers the specifics of interpreting the results of almost periodic analysis in the problem of structural segmentation of a snow avalanche, applicable to increasing the efficiency of forecast models and improving avalanche control measures. The preliminary stage of linearization of the avalanche structure is based on the polygonal approximation of the body area of the phenomenon, presenting the data in a rectangular format. The study of straightened data allows us to form a network of uniform rectangular areas of uniform data, for which the problem of displaying the markup on the original data arises. Such markup allows us to clearly separate the areas of laminar and turbulent avalanche descent, as well as to highlight the significant boundaries of the areas of onset, development and braking of the snow mass. The article provides mathematical and algorithmic support necessary for reproducing longitudinal and transverse boundaries on the original data for sequences of polygons of arbitrary duration. The results can be applied in the development of visualization systems, warning and prevention of avalanche activity, thereby stimulating the strengthening of the effectiveness of measures to prevent damage from hazardous natural phenomena.

Keywords: almost periodic analysis, data analysis, image processing, avalanches, natural hazards, visualization, polygonal transformation.

References

1. Saidov, M. S. State of avalanche mapping in Tajikistan: avalanche-forming factors and a brief review of snow avalanche forecasting methods / M. S. Saidov // Bulletin of the Branch of the Moscow State University named after M.V. Lomonosov in Dushanbe. - 2024. - V. 1, No. 1 (37). - P. 125-133. - EDN GXNWPE.
2. Bykov, N. I. Dendrochronological analysis of snow avalanches in Altai / N. I. Bykov, N. V. Rygalova, A. A. Shigimaga // Fundamental geography in Siberia: stages of development, results and prospects: Proceedings of the International Scientific Conference, dedicated to the memory of outstanding geographers: the 95th anniversary of the birth of Vladimir Vasilyevich Vorobyov, the 85th anniversary of the birth of Valerian Afanasyevich Snytko, the 75th anniversary of the birth of Alexander Nikolaevich Antipov, Irkutsk, November 27–30, 2024. – Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2024. – P. 283–285. – EDN GCDQTU.
3. Geoinformation research for monitoring snow avalanches in the East Kazakhstan region of the Republic of Kazakhstan / O. A. Petrova, G. K. Daumova, N. F. Denisova [et al.] // InterCarto. InterGIS. - 2024. - V. 30, No. 1. - P. 545-555. - DOI 10.35595/2414-9179-2024-1-30-545-555. - EDN FSBVCY.
4. Chernichenko, E. I. Snow avalanches - features of formation / E. I. Chernichenko // Rational use of natural resources for sustainable development: Proceedings of the III interre-

gional conference of students of secondary general, secondary vocational and higher education institutions, held with the support of the Krasnoyarsk Regional Science Foundation, Krasnoyarsk, October 16-18, 2024. - Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2024. - P. 164-167. - EDN KPKQOH.

5. Kalach, A. V. Model and algorithm for the interaction of a snow avalanche with structures / A. V. Kalach, A. S. Soloviev, T. V. Lentiaeva // Technologies of techno-spheric safety. - 2024. - No. 1 (103). - P. 152-163. - DOI 10.25257/TTS.2024.1.103.152-163. - EDN ALXLFY.

6. Lentiaeva, TV Software implementation of a three-dimensional model of snow mass dynamics / TV Lentiaeva // Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia. - 2023. - No. 3. - Pp. 104-111. - EDN PWQYLY.

7. On the issue of modeling snow avalanches with insufficient data / AS Turchaninova, SA Sokratov, Yu. G. Seliverstov [et al.] // GeoRisk. - 2020. - Vol. 14, No. 1. - Pp. - DOI 10.25296/1997-8669-2020-14-1-38-47. - EDN GCDUTN.

8. Zhukova, E. D. Assessment and consideration of avalanche danger in the development of resorts (on the example of Krasnaya Polyana) / E. D. Zhukova // Engineering surveys in construction: Proceedings of the fourth All-Russian scientific and practical conference of young specialists, Moscow, April 29, 2022. - Moscow: Geomarketing, 2022. - P. 134-139. - EDN PPRSCG.

9. Kalach, A. V. Application of quasi-periodic analysis of cyclone activity dynamics images for developing management decisions to increase the resilience of territories in emergency situations / A. V. Kalach, A. A. Paramonov // Theory and practice of increasing the resilience of urbanized territories in emergency situations: Collection of materials of the international round table (within the framework of the XV International Salon of Security Means "Integrated Security-2024"), Congress and Exhibition Center "Patriot", Kubinka, Moscow Region, May 30, 2024. - Moscow: All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2024. - P. 106-112. - EDN UUIGZ