

УДК 004.93

DOI: 10.37890/jwt.vi86.684

Технология контроля ледового покрова на основе семантической сегментации облака точек

И.К. Фомина

ORCID: 0000-0003-0999-3339

Е.А. Смирнов

ORCID: 0009-0007-7621-3140

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Контроль ледовой обстановки на реках, озерах и в прибрежных морских акваториях является критически важной задачей для обеспечения безопасности судоходства, оптимизации и продления навигации, а также функционирования портовой инфраструктуры в условиях сезонного ледостава. Особую актуальность технология приобретает в контексте развития арктических маршрутов, включая Северный морской путь, где динамика и прочность льда напрямую влияют на логистическую эффективность и безопасность плавания. В статье предложена технология инструментального мониторинга прочности и толщины льда с использованием мобильных лидар-сканеров и методов семантической сегментации облаков точек, позволяющая снизить операционные риски для водного транспорта и обеспечить своевременное принятие решений. Реализация ориентирована на профессиональных пользователей (экипажи судов, службы портов, администрации) и представлена в виде мобильного приложения, выполняющего вычисления локально с применением высокопроизводительных оптимизированных библиотек с ядрами на C/C++.

Ключевые слова: лидар, мобильное 3D-сканирование, облака точек, семантическая сегментация, ледовый покров, безопасность судоходства, продление навигации, Северный морской путь, мониторинг льда, толщина льда, point-in-polygon, OpenCV, NumPy, Shapely, Ultralytics, Open3D.

Technology for ice cover control based on semantic segmentation of a point cloud

Inga K. Fomina

ORCID: 0000-0003-0999-3339

Egor A. Smirnov

ORCID: 0009-0007-7621-3140

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Monitoring the ice situation on rivers and reservoirs remains a challenging applied task for ensuring the safety of ice crossings, recreation areas, and ice fishing sites, as well as preventing natural and man-made disasters in regions with seasonal ice cover. This article proposes a technology for instrumental monitoring of ice strength using mobile lidar scanners and semantic segmentation methods for point clouds, which can help reduce risks to human life, water infrastructure, and the overall economy of the industry. The implementation is aimed at the mass user, in the form of a mobile application that performs calculations locally using high-performance libraries with C/C++ cores.

Keywords: lidar, mobile 3D scanning, point clouds, semantic segmentation, ice cover, polynya, ice thickness determination, point-in-polygon, OpenCV, NumPy, Shapely, Ultralytics, Open3D.

Введение

Глобальное изменение климата привело за последнее десятилетие к значительным изменениям в сроках ледостава, продолжительности и характеристиках ледового покрова. Эти изменения напрямую затрагивают гидрологический режим и хозяйственную деятельность, связанную с водным транспортом. Нестабильность ледовой обстановки создает значительные риски для безопасной эксплуатации судов, работы портов, а также повышает опасность ледовых заторов и наводнений в период ледохода. Для ключевых арктических маршрутов, таких как Северный морской путь, оперативный и точный контроль состояния льда становится фактором экономической и навигационной безопасности.

Существующие практики контроля прочности льда — визуальная оценка, бурение контрольных лунок, линейные измерения промером — субъективны, трудозатратны и небезопасны для исполнителя. Официальный мониторинг ледовой обстановки традиционно ведётся с применением дорогостоящих средств аэрофотосъёмки и радаров, что плохо масштабируется с оперативным контролем специалистами, работающими на судах водного транспорта. Параллельно, стремительное распространение мобильных устройств с технологией бортового лазерного дистанционного зондирования (LiDAR), делает актуальным создание безопасных, доступных и точных методов инструментального контроля, для отслеживания и создания трёхмерных карт процессов ледостава [1-3]. Контроль ледового покрова на основе семантической сегментации облаков точек, получаемых мобильным лидаром, с последующим расчётом толщины льда и отображением зон риска в пользовательском интерфейсе, позволяет адаптировать инфраструктуру водопользования и своевременно осуществлять меры по снижению рисков взаимодействия водных экосистем и транспорта.

Методы и материалы

Развитие мобильного лидар-сканирования позволяет формировать детальные облака точек локального участка льда с точностью, достаточной для геометрических построений в удобном для пользователя режиме. Для автоматизации анализа целесообразно применять модели семантической сегментации как непосредственно в 3D-облаке (PointNet/PointNet++, RandLA-Net, Sparse-U-Net на разреженных свёртках), так и в 2.5D-представлении (проекция на карту дальности/глубины с последующим переносом меток обратно в 3D). Ввиду ограничений по памяти и энергии мобильных устройств предлагается гибридный подход, сочетающий лёгкие 2D-сети и геометрические постобработки [4,5]. Такая структурная логика широко используется в прикладных задачах компьютерного зрения для отраслей транспорта и промышленности.

Особую остроту проблема оперативного контроля ледового покрова приобретает на судоходных путях с сезонным ледоставом, где риски наиболее велики, а требования к простоте и эффективности решений максимальны. К таким артериям относятся [1,2]:

1. Ключевые арктические маршруты (Северный морской путь). Здесь динамика льда крайне нестабильна из-за климатических изменений, а традиционные методы ледокольной проводки энергозатратны. Согласно исследованиям, мощность энергетической установки судна (N) на воздушной подушке, необходимой для резонансного разрушения льда, нелинейно растёт с увеличением его толщины: $N_{\text{сум}} = k \times (h_{\text{льда}})^\alpha$, где $\alpha > 1$. Это делает критически важным точное знание локальной толщины льда для планирования безопасного и экономичного маршрута.

2. Внутренние водные пути (сибирские реки Обь, Енисей, Лена) и припортовая инфраструктура. На этих объектах логистика зависит от короткой навигации, а ледовая разведка часто проводится устаревшими методами. Проблема усугубляется образованием торосов и промоин, создающих локальные зоны повышенной опасности для судов, не обладающих ледокольным классом.

Таким образом, для данных маршрутов необходимы простые и эффективные технологии, не требующие сложного оборудования и позволяющие проводить оценку непосредственно силами экипажей судов или портовых служб.

При резонансном методе разрушения лёд рассматривается как плавающая упругая пластина. Судно на воздушной подушке (СВП), двигаясь с критической (резонансной) скоростью, вызывает в этой пластине изгибно-гравитационные волны большой амплитуды, что приводит к разрушению льда при относительно малых энергозатратах.

Критическая скорость (V_{crit}) напрямую зависит от толщины льда (h). Упрощенная формула для ее оценки в случае тонкого льда имеет вид: $V_{crit} \approx \sqrt{g \times h}$, где g — ускорение свободного падения.

На рисунке 1 изображена зависимость суммарной мощности энергоустановки судна на воздушной подушке от толщины разрушаемого льда (резонансный метод). График иллюстрирует критический рост энергозатрат, что обосновывает необходимость точного измерения толщины льда h для планирования маршрута.

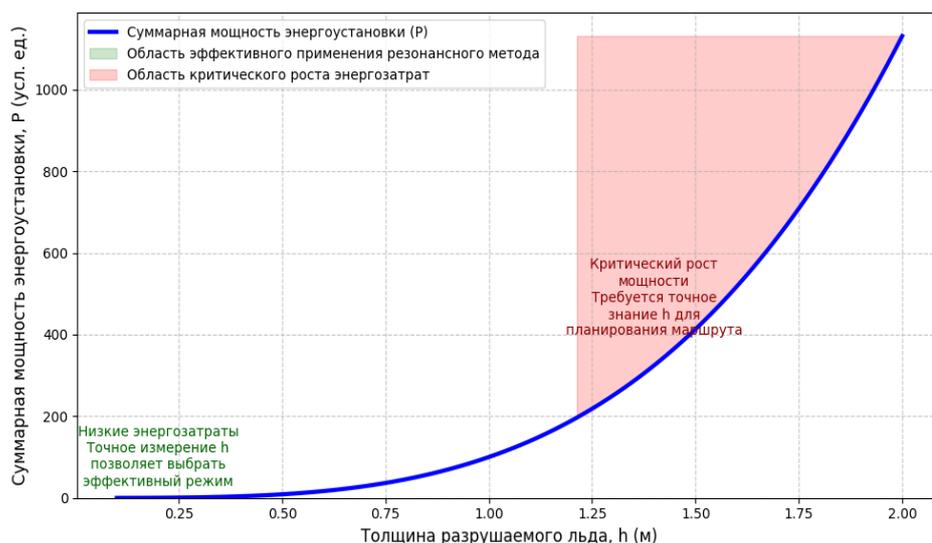


Рис. 1. Зависимость суммарной мощности энергоустановки судна на воздушной подушке от толщины разрушаемого льда (резонансный метод)

С помощью встроенных конструкций мобильной лидарной системы фиксируется пространственная информация, включающая интенсивность отражения лазерного сигнала (показатель I) и цветовые данные (c) с сопряжённой RGB камеры; положение и ориентация устройства в пространстве вычисляется встроенным модулем SLAM (Simultaneous Localization And Mapping); выполняется однократная внешняя и внутренняя калибровка для согласования системы координат.

Съёмка производится со стороны берега или моста с охватом кромки льда и, по возможности, открытой воды (польны/лунки), что обеспечивает привязку высотной отметки водной поверхности (рисунок 2).



Рис. 2. Фронтальная съёмка льда технология 3s Scanner App

Семантическая сегментация, адаптированная к задаче анализа ледовой обстановки, выделяет объекты (например точке в 3Dпространстве) и присваивает семантическую метку (класс): «лёд», «вода», «снег» и др. в соответствии с их смысловой принадлежностью. Далее «почти двумерные» данные (2.5D) формируют маску сегментации, включающую дополнительную информацию о глубине/высоте. Что позволяет сгенерировать полные трехмерные (3D) данные с дополнительными признаками точек исходного облака, методом обучения с комбинированной функцией потерь. Для согласования результатов применяется CRF (Conditional Random Fields) постобработка для сглаживания и уточнения границ, на графе k - ближайших соседей (kNN). Опасные зоны (полыньи, промоины, разжижение льда) задаются как 2Dполигоны, программная реализация опирается на библиотеку Shapely (GEOS), корректно обрабатывающую граничные случаи и самопересечения [5-7]. Все шаги реализуются в векторизованном виде (NumPy) и/или через ускоренные C/C++-ядра (Open3D, OpenCV), что обеспечивает ускорение исполнения на порядки по сравнению с наивными Python-циклами.

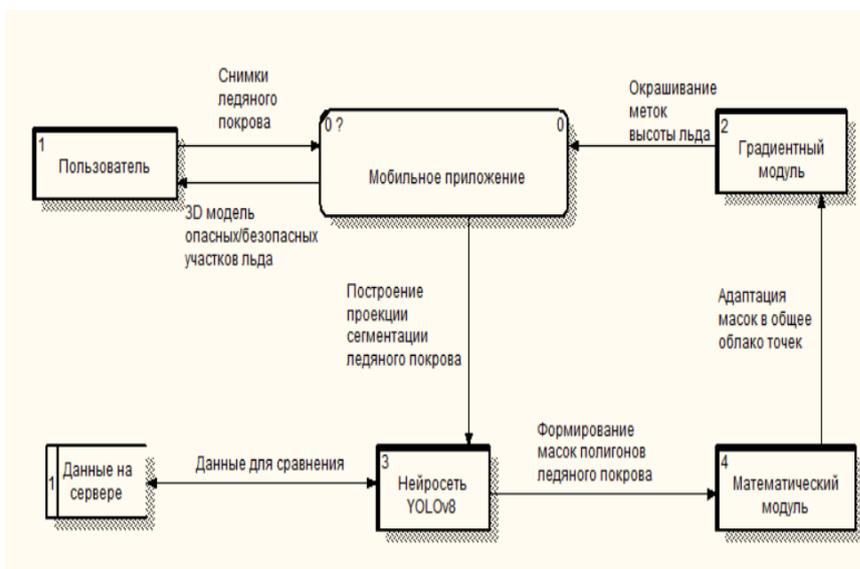


Рис. 3. Информационная система распознавания объектов ледостава

Разработанная информационная система (ИС) анализа ледяного покрова объединяет технологию компьютерного зрения (YOLOv8), геометрическую обработку изображений льда и его градиентное окрашивание, визуализирующее для пользователя опасные зоны на льду.

На рисунке 3 представлена диаграмма потока данных (DFD), описывающая процесс анализа снимков ледяного покрова с использованием мобильного приложения и разработанных вспомогательных модулей. Схема иллюстрирует последовательность обработки данных — от получения снимков до формирования 3D-модели опасных и безопасных участков льда. В соответствии принципа гидростатического равновесия для пресноводного льда и соотношения между надводной (10% объёма) и подводной частями льдины, полная толщина льда $H_{\max} = H_{\text{upwater}}/0,1$ (м), что и используется в расчетах математического модуля.

Программно-аппаратная архитектура, разработанной ИС включает следующие этапы [8,9].

1. Сбор пространственных данных осуществляется с помощью мобильного приложения на платформах iOS/Android, управляющего сканированием и одновременной локализацией и построением карты SLAM. Нейросетевая модель YOLO v8, используя технологии глубокого обучения, выполняет первичную сегментацию на базе программных решений PyTorch, Lite, CoreML, NNAPI. Опционально включается 3Dветка для построения трехмерной модели сцены на основе результатов сегментации.

2. Математический модуль, проверяет принадлежность 3D – точек к полигонам опасных зон, в рамках пространственного анализа, используя библиотеки Shapely и GEOS. Цель данного модуля необходимость идентификации, точек находящиеся около заданного уровня высоты льда и определить попадают ли они в опасные зоны.

3. В рамках математического модуля реализован алгоритм вычисления локальной толщины ледяного покрова h_i на основе пространственного распределения точек, идентифицированных как принадлежащие опасной зоне (рисунок 4).

```

for height in height_levels:
    # Находим все точки меша на этой высоте в пределах маски
    points_in_mask = []
    for i in range(mesh.npoints):
        x, y, z = mesh.points[i]
        if abs(y - height) < 0.02 * (y_max - y_min):
            p = Point(x, z)
            for candidate in [shapely_geoms[i] for i in tree.query(p)]:
                for poly in get_all_polygons(candidate):
                    if poly.buffer(0.05).contains(p):
                        points_in_mask.append([x, y, z])
                        break
    
```

Рис. 4. Алгоритм определения принадлежности каждой точки маскам сегментации

4. Градиентный модуль визуализирует результаты анализа пространственных данных, в рамках пользовательского интерфейса UI, формируя тепловую карту риска («безопасно/с осторожностью/опасно») и выводит её на экран (рисунок 5). Тепловая карта отображает опасную красную зону, насыщенный синий цвет демонстрирует безопасную высоту и плотность льда.

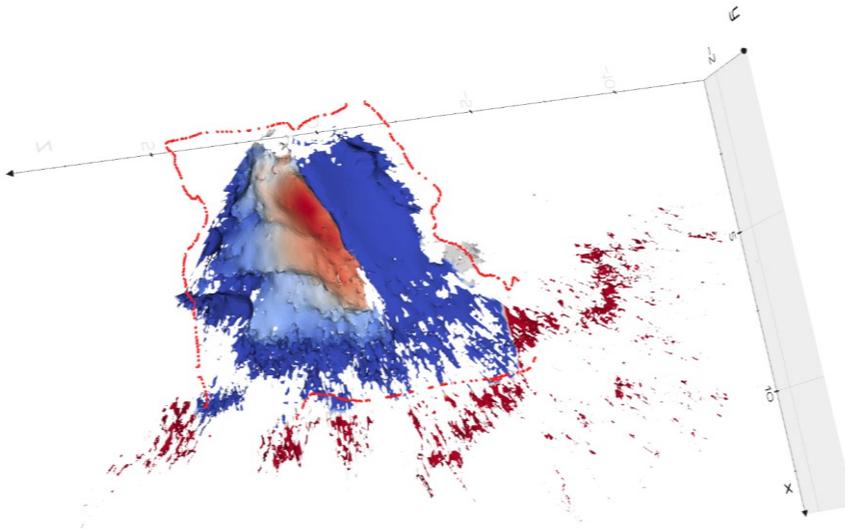


Рис. 5. Вид модели ледяного покрова после обработки

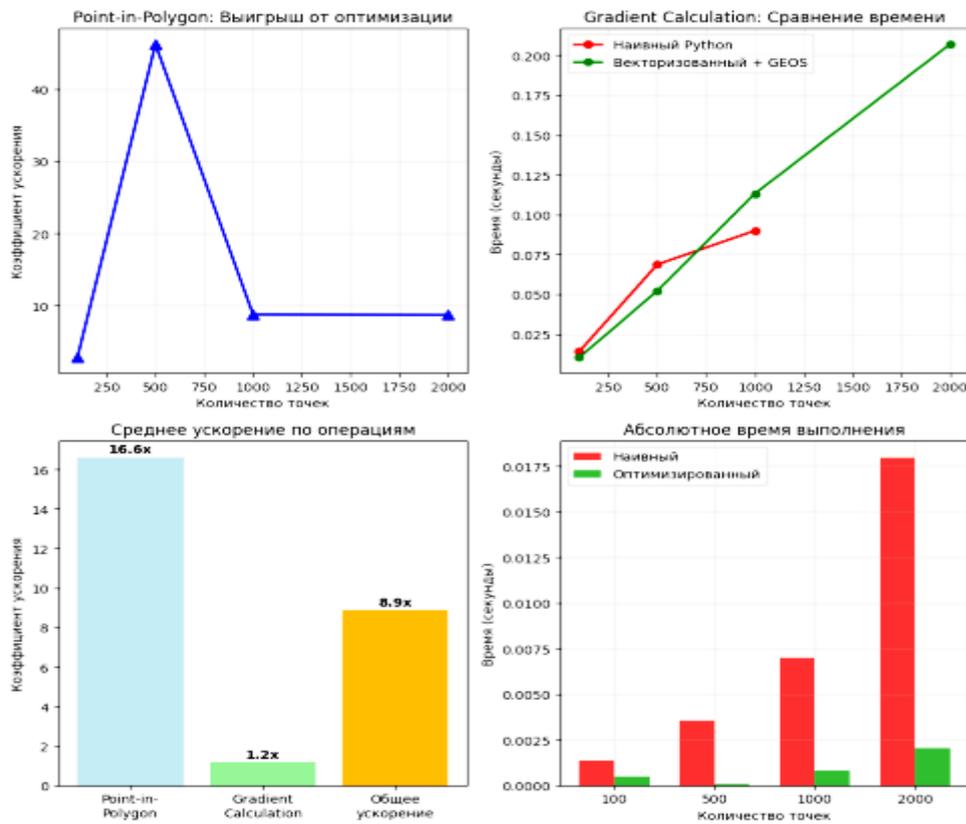


Рис. 6. Сравнительный анализ производительности подходов к решению задачи: наивный и реализованный в информационной системе

Результаты

В рамках разработанной системы, сформулированы следующие результаты:

1. Разработана практическая методология для оперативного контроля ледовой обстановки. Предложен и реализован подход, сочетающий мобильное LiDAR сканирование, семантическую сегментацию облаков точек (2.5D/3D) и графическую постобработку для анализа характеристик льда.
2. Создана работоспособная информационная система анализа ледяного покрова, формирующая визуальную, тепловую карту риска (безопасно, с осторожностью, опасно) для наглядного представления результатов конечным пользователям и муниципальным службам [10,11].
3. Достигнута высокая вычислительная эффективность, позволяющая за счёт векторизации и использования высокопроизводительных библиотек NumPy, OpenCV, GEOS, достигать повышение вычислительной эффективности вплоть до нескольких порядков относительно наивной интерпретации на Python, что позволяет работать без дискретной видеокарты на мобильном CPU/NeuralCore (рисунок 6). Благодаря оптимизации: система сохраняет работоспособность без дискретного графического ускорителя (GPU); обработка данных выполняется на встроенном CPU или Neural Core мобильных устройств, что критически важно для полевых сценариев применения. Таким образом, интеграция векторизованных операций и низкоуровневых ядер позволяет реализовать ресурсоёмкие алгоритмы компьютерного зрения и пространственного анализа в условиях ограниченных вычислительных мощностей мобильных устройств.
4. Практическая значимость разработки подтверждена для судоходства, внутренних водных путей и портов, предоставляет возможность оперативно выявлять опасные зоны (торосы, промоины разжижение) без сложного оборудования. Доказана техническая реализация и приведены визуальные результаты.
5. Дальнейшие направления развития и совершенствования технологии определены и включают увеличение обучающих данных для разных погодных условий и последующее дообучение сетей.

Заключение

В результате проведенного исследования разработано практически применимое программно-аппаратное решение, которое позволяет осуществлять быстрый и точный анализ ледовой обстановки, визуализировать зоны риска для повышения навигационной и экономической безопасности. Цели, поставленные в исследовании достигнуты:

1. Решение представляет собой готовое к использованию приложение, не требующее сложного оборудования или специально обученного персонала.
2. Доступность эксплуатации программно-аппаратной информационной системы обеспечивается использованием массовых мобильных устройств и исключает выход человека на лёд (съёмка с берега/моста).
3. Доказано ускорение вычислений на порядки за счет оптимизации (NumPy, OpenCV, C++ ядра). Точность заявлена и подтверждена моделью расчета.
4. Описана полная цепочка автоматической обработки от «сырых» данных облака точек до классифицированной 3D-модели с визуализированными зонами риска.

Список литературы

1. Романов А.В. Дорожная карта современных гидрологических прогнозов водного режима // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 12. С. 12-26. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-12-12-26.
2. Квач Е.Г. Особенности гидрологического режима трансграничных водных объектов Республики Беларусь и Российской Федерации // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2023. № 4. С. 93-104. DOI 10.35567/19994508_2023_4_3.
3. Каюмов А.К., Расулзода Т.Х., Курбонов Н.Б., Восидов Ф.К. Влияние изменения климата на гидрологический режим водных артерий бассейна реки Пяндж // *Криосфера*. 2022. № 1(5). С. 91-104.
4. Бураков И.И., Федоров В.О. Использование библиотек NUMPY, NUMPY-STL И OPENCV при построении трехмерной модели зуба // *Оригинальные исследования*. 2022. № 4(12). С. 48-59.
5. Семенов И.А., Шефер П.П. Использование библиотеки Numpy для языка программирования Python в работе ученого и инженера // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2024. № 11. С. 167-168.
6. Масаев С.Н., Ильгов А.Р. Применение генетического алгоритма для оптимизации двумерных массивов с использованием библиотеки Numpy в Python // *Информатизация и связь*. 2025. № 2. С. 27-32. DOI 10.34219/2078-8320-2025-16-2-27-32.
7. Ненашев В.А., Воронов Р.М., Березин А.В., Матвеев А.Д., Лосев В.К. Распознавание наземных объектов в авиационных системах потоковой обработки оптических кадров // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2024. № 4(22). С. 85-90.
8. Тарануха С.Н., Кузьмин А.А., Фомина И.К., Фомин В.В. Сверточные нейронные сети в задачах оценки формирования компетенций обучающихся основам сварки // *Транспортное дело России*. 2025. № 2. С. 116-120.
9. Козин В.М., Лебедев А.А. Энергоэффективные технологии разрушения ледяного покрова судами на воздушной подушке резонансным методом // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. 2022. № 3. С. 20-26.
10. Фомина И.К., Супрунец М.И., Корниенко К.Ю., Фомин В.В. Применение нейросетевых технологий для контроля состояния остановочных павильонов городского транспорта // *Транспортное дело России*. 2025. № 4. – С. 86-90.
11. Фомин В.В., Фомина И.К., Шабунин А.П. Исследование потенциала BERT-трансформера для тематической классификации новостных и научных статей // *Информатизация образования и науки*. 2025. № 2(66). С. 59-69.

References

1. Romanov A.V. Dorozhnaya karta sovremenny`x gidrologicheskix prognozov vodnogo rezhima [Roadmap for Modern Hydrological Forecasts of Water Regime], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2023, no 12. pp. 12-26. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-12-12-26. (In Russ).
2. Kvach E.G. Osobennosti gidrologicheskogo rezhima transgranichny`x vodny`x ob`ektov Respubliki Belarus` i Rossijskoj Federacii [Features of the Hydrological Regime of Transboundary Water Objects in the Republic of Belarus and the Russian Federation], *Vodnoe khozyajstvo Rossii: problemy`, tehnologii, upravlenie* [Water Management in Russia: Problems, Technologies, and Management], 2023, no 4. pp. 93-104. DOI 10.35567/19994508_2023_4_3. (In Russ).
3. Kayumov A.K., Rasulzoda T.X., Kurbonov N.B., Vosidov F.K. Vliyanie izmeneniya klimata na gidrologicheskij rezhim vodny`x arterij bassejna reki Pyandzh [Vliyanie izmeneniya klimata na gidrologicheskij rezhim vodny`x arterij bassejna reki Pyandzh], *Kriosfera* [Kriosfera], 2022, no 1(5). pp. 91-104. (In Russ).
4. Burakov I.I., Fedorov V.O. Ispol`zovanie bibliotek NUMPY, NUMPY-STL I OPENCV pri postroenii trexmernoj modeli zuba [Use of NUMPY, NUMPY-STL, and OPENCV Libraries in Constructing a Three-Dimensional Tooth Model], *Original`ny`e issledovaniya* [Original Research], 2022, no 4(12). pp. 48-59. (In Russ).

5. Semenov I.A., Shefer P.P. Ispol'zovanie biblioteki Numpy dlya yazy'ka programmirovaniya Python v rabote uchenogo i inzhenera [Using the Numpy Library for the Python Programming Language in the Work of Scientists and Engineers], *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskij progress [Modern Technologies and Scientific and Technical Progress]*, 2024, no 11, pp. 167-168. (In Russ).
6. Masaev S.N., Il'gov A.R. Primenenie geneticheskogo algoritma dlya optimizacii dvumerny'x massivov s ispol'zovaniem biblioteki Numpy v Python [Application of a genetic algorithm for optimizing two-dimensional arrays using the Numpy library in Python], *Informatizaciya i svyaz' [Informatization and Communication]*, 2025, no 2, pp. 27-32. DOI 10.34219/2078-8320-2025-16-2-27-32. (In Russ).
7. Nenashev V.A., Voronov R.M., Berezin A.V., Matveev A.D., Losev V.K. Raspoznavanie nazemny'x ob'ektov v aviacionny'x sistemax potokovoj obrabotki opticheskix kadrov [Recognition of Ground Objects in Aviation Systems for Streaming Optical Frame Processing], *Informacionno-izmeritel'ny'e i upravlyayushhie sistemy' [Information, Measurement, and Control Systems]*, 2024, no 4(22), pp. 85-90. (In Russ).
8. Taranuxa S.N., Kuz'min A.A., Fomina I.K., Fomin V.V. Svertochnyye nejronny'e seti v zadachax ocenki formirovaniya kompetencij obuchayushhixsya osnovam svarki [Convolutional Neural Networks in the Tasks of Assessing the Formation of Competencies of Students in the Basics of Welding], *Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia]*, 2025, no 2, pp. 116-120. (In Russ).
9. Kozin V.M., Lebedev A.A. E'nergoeffektivny'e tekhnologii razrusheniya ledyanogo pokrova sudami na vozduшной podushke rezonansny'm metodom [Energy-Efficient Technologies for Breaking Ice Cover by Hovercrafts Using the Resonance Method], *Vestnik inzhenernoj shkoly' DVFU [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University]*, 2022, no 3, pp. 20-26. (In Russ).
10. Fomina I.K., Suprunecz M.I., Kornienko K.Yu., Fomin V.V. Primenenie nejrosetevy'x tekhnologij dlya kontrolya sostoyaniya ostanovochny'x pavil'onov gorodskogo transporta [Application of neural network technologies for monitoring the condition of urban transport stoppings], *Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia]*, 2025, no 4, pp. 86-90. (In Russ).
11. Fomin V.V., Fomina I.K., Shabunin A.P. Issledovanie potentsiala BERT-transformera dlya tematiceskoy klassifikacii novostny'x i nauchny'x statej [Research of the BERT Transformer's Potential for the Thematic Classification of News and Scientific Articles], *Informatizaciya obrazovaniya i nauki [Informatization of Education and Science]*, 2025, no 2(66), pp. 59-69. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ // INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фомина Инга Константиновна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. (ФГАОУ ВО ГУАП) 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. fominga@list.ru

Inga K. Fomina, Associate Professor, PhD, Tech., Associate Professor at the Department of Computing Systems and Networks at the St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. (FGAOU VO GUAP) 190000, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya Street, 67, Building A. fominga@list.ru

Смирнов Егор Андреевич, бакалавр кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. (ФГАОУ ВО ГУАП) 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А., egor4e4ik@gmail.com

Egor A. Smirnov, Bachelor of the Department of Computing Systems and Networks of the St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. (FGAOU VO GUAP) 190000, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67, lit. A., egor4e4ik@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29.12.2025; принята к публикации 05.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 29.12.2025; published online 20.03.2026.