

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕРАВНОВЕСНЫХ,
АДАПТИВНЫХ И
УПРАВЛЯЕМЫХ
СИСТЕМ – 2026**

Министерство науки и высшего образования РФ
Сибирское отделение РАН
Сибирский федеральный университет
Институт вычислительного моделирования СО РАН
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН
Институт физики СО РАН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕРАВНОВЕСНЫХ, АДАПТИВНЫХ И
УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ-2026**

МАТЕРИАЛЫ
ДВАДЦАТЬ ДЕВЯТОГО ВСЕРОССИЙСКОГО СЕМИНАРА
2 октября 2026 года

Красноярск 2026

УДК 001.126 (571.51) (043)

М 74

Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем:
Материалы XXIX Всероссийского семинара, / Под ред. О.Э. Якубайлика; отв. за
вып. М.Ю. Сенашова; – Красноярск: Институт вычислительного моделирования
Сибирского отделения Российской академии наук, 2026. –153 с.

*В сборнике представлены материалы XXIX Всероссийского семинара
«Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем» (МНАУС–2026),
проходившего в городе Красноярске 2 октября 2026 г.*

*Проблема моделирования неравновесных систем – одна из важнейших
современных научных проблем на стыке математического моделирования, физики,
химии, биологии, социальных наук. Важнейшим итогом конференции является обмен
последними результатами в различных областях моделирования и исследования
неравновесных моделей, описывающих самые различные конкретные системы в
области химии, биоинформатики, экологии, генетики, биофизики, социологии,
демографии, теории управления сложными системами, теории управления
рефлексивными системами, политологии. Среди главных достижений конференции –
формирование целостного взгляда на подходы в моделировании неравновесных систем
различной природы среди участников этой конференции, распространение опыта и
новейших методов моделирования и анализа таких систем на более широкие области
применимости.*

*Материалы предназначены для научных работников, преподавателей,
студентов и аспирантов соответствующих специальностей.*

**Конференция проводится при поддержке Красноярского математического
центра, финансируемого Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и
развитию региональных НОМЦ (Соглашение № 075-02-2026-735).**

Редакционная коллегия:

Якубайлик Олег Эдуардович – ответственный редактор

Сенашова Мария Юрьевна – ответственный за выпуск

© ИВМ СО РАН, 2026

© Коллектив авторов, 2026

ISBN 978-5-6054684-4-8



9 785605 468448 >

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИЕВОМ n - p ПЕРЕХОДЕ, ОБЛУЧЕННОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОТОНАМИ

Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко

Кубанский государственный университет, bogatov@phys.kubsu.ru

В современной научной литературе значительное внимание уделяется исследованию радиационной стойкости полупроводниковых материалов и приборов. Кремний – один из наиболее используемых и изученных материалов полупроводниковой электроники. Управление свойствами полупроводниковых материалов и создание новых полупроводниковых структур с помощью облучения ионизирующими частицами (инженерия радиационных дефектов) – актуальное направление полупроводниковой технологии [1].

В работах [2–4] исследовались кремниевые n^+ - p структуры, облученные низкоэнергетическими протонами. Показано, что облучение протонами с энергией 180 кэВ, флюенсом 10^{15} см^{-2} изменяет физические свойства области пространственного заряда (ОПЗ) n^+ - p перехода.

Цель работы – анализ распределения радиационных дефектов в диффузионном кремниевом n^+ - p переходе, облученном протонами с энергией $E_p = 180 \text{ кэВ}$ и флюенсом $F = 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Радиационные дефекты (РД), образующиеся под действием ионизирующих частиц, подразделяются на простые, первичные и вторичные в зависимости от механизма образования [5]. Вакансии и междоузельные атомы Si, образовавшиеся в результате разделения пар Френкеля, называются простыми радиационными дефектами [6]. Простые радиационные дефекты взаимодействуют на стадии каскадного размножения, вакансии и междоузельный атом, остановившийся около нее, могут аннигилировать, вакансии объединяются в дивакансии, тривакансии, тетравакансии и более сложные скопления [6]. Многовакансионные комплексы играют роль зародышей аморфной фазы или областей разупорядочения. Нерекombинировавшие междоузельные атомы Si_i и вакансии V, а также дивакансии W, многовакансионные комплексы и области

разупорядочения, образовавшиеся в каскаде смещений, называются первичными радиационными дефектами (ПРД) [5].

Вторичные радиационные дефекты (ВРД) образуются в результате взаимодействия ПРД с примесями и другими дефектами. К ВРД в кремнии относятся А-центры (комплексы VO), Е-центры (комплексы VP), К-центры (комплексы Si_IC), комплексы Si_IB, дивакансии и др., а также области разупорядочения (do). Кинетика радиационного дефектообразования описывается феноменологической системой уравнений квазихимических реакций [6]:

$$\frac{N_k(t)}{dt} = G_k' + \sum_{ij} K_{ij}^k N_i(t) N_j(t) - a_k N_k(t) \quad (1)$$

где t – время, $N_k(t)$, $N_i(t)$, $N_j(t)$ – концентрация ВРД k -, i -, j -го типа соответственно; $G_k' = G_k \cdot \varphi_0$ – объёмная скорость генерации ПРД k -го типа, образующихся в результате воздействия ионизирующего излучения, G_k – линейная скорость генерации ПРД, k -го типа, $\varphi_0 = F/t_\Phi$ – интенсивность потока частиц, t_Φ – время облучения; K_{ij}^k – коэффициент, характеризующий вероятность образования ВРД k -го типа в результате взаимодействия дефектов i -го и j -го типов; a_k – коэффициент, характеризующий вероятность диссоциации ВРД k -го типа или их исчезновение на стоках. Из формулы (1) видно, что концентрация ВРД определяется линейной скоростью генерации ПРД G_k . Для расчёта концентрации ВРД использовалась феноменологическая модель образования ПРД с учётом температурных зависимостей вероятностей разделения заряженных и нейтральных пар Френкеля [7, 8].

В [9] выполнен анализ теоретических и экспериментальных данных, описывающих формирование ВРД. В результате выделены следующие основные уравнения квазихимических реакций образования ВРД:





где V – вакансия, O_I – междоузельный кислород, Si_I – междоузельный кремния, VO_I – А-центр, P_S – фосфор замещения, VP_S – Е-центр, B_S – бор замещения, C_S – углерод замещения, C_I – междоузельный углерод.

Уравнения вида (1) для реакций ((2) –(7)) сведены к следующей системе дифференциальных уравнений в [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_A}{dt} = \frac{G_V^{\cdot} (N_{O_I}^0 - N_K - N_A)}{(N_{O_I}^0 - N_K - N_A) + \gamma_{V,P/V,O} (N_{P_S}^0 - N_E)} - \\ - \frac{G_{Si}^{\cdot} N_A}{N_A + \gamma_{Si,C/Si,A} (N_{C_S}^0 - N_K) + \gamma_{Si,B/Si,A} (N_{C_S}^0 - N_{Si_B})}, \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\frac{dN_E}{dt} = \frac{G_V^{\cdot} (N_{P_S}^0 - N_E)}{(N_{P_S}^0 - N_E) + \gamma_{V,P/V,O}^{-1} (N_{O_I}^0 - N_K - N_A)}, \quad (9)$$

$$\frac{dN_K}{dt} = \frac{G_{Si}^{\cdot} (N_{C_S}^0 - N_K)}{(N_{C_S}^0 - N_K) + \gamma_{Si,B/Si,C} (N_{B_S}^0 - N_{Si_B}) + \gamma_{Si,C/Si,A}^{-1} N_A}, \quad (10)$$

$$\frac{dN_{Si_B}}{dt} = \frac{G_{Si}^{\cdot} (N_{B_S}^0 - N_{Si_B})}{(N_{B_S}^0 - N_{Si_B}) + \gamma_{Si,B/Si,C}^{-1} (N_{C_S}^0 - N_K) + \gamma_{Si,B/Si,A}^{-1} N_A}, \quad (11)$$

где $G_{Si}^{\cdot}$, $G_V^{\cdot}$ – объёмные скорости генерации междоузельного кремния, вакансии соответственно [9]; $N_{P_S}^0$, $N_{B_S}^0$, $N_{C_S}^0$, $N_{O_I}^0$ – начальные концентрации фосфора, бора, углерода и кислорода соответственно; N_A , N_E , N_K , N_{Si_B} – концентрации А-, Е-, К-центров и комплекса Si_IB соответственно, $\gamma_{V,P/V,O} = 60$; $\gamma_{Si,C/Si,A} = 0,1$; $\gamma_{Si,B/Si,A} = 80$; $\gamma_{Si,B/Si,C} = 800$ [9].

Для определения концентраций ВРД система уравнений (8)(11) решалась численно с начальными условиями при $t = 0$: $N_A(0) = N_K(0) = N_E(0) = N_{Si_B}(0) = 0$. Отрезок интегрирования $t \in [0; t_{\Phi}]$. Концентрация дивакансий N_W и областей разупорядочения N_{do} рассчитывается как $N_W = G_W \cdot F$, $N_{do} = G_{do} \cdot F$, где G_W , G_{do} – линейная скорость генерации соответствующих РД [9].

Для соответствия расчётов с характеристиками реальной кремниевой n^+p-p^+ структуры концентрация примесных атомов бора (акцепторы) считалась постоянной $N_B = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация атомов фосфора (доноры) рассчитывалась по формуле (12), моделирующей диффузионное распределение

примесей.

$$N_p(x) = N_{p0} \operatorname{erfc}(x / d_0), \quad (12)$$

где $N_{p0} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ – концентрация фосфора на поверхности $x = 0$, d_0 является корнем уравнения $N_p(w_n) = N_B$, $w_n = 0,45 \text{ мкм}$ – глубина залегания $n^+ - p$ перехода. Кремний, выращенный методом Чохральского, содержит фоновые примеси кислорода $N_O = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, углерода $N_C = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Рассмотрим результаты расчётов, моделирующие образование ВРД протонами с энергией $E_p = 180 \text{ кэВ}$ и флюенсом $F = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при температуре облучения $T = 300 \text{ К}$. Тормозная способность протонов в кремнии рассчитывалась с помощью программы SRIM [10].

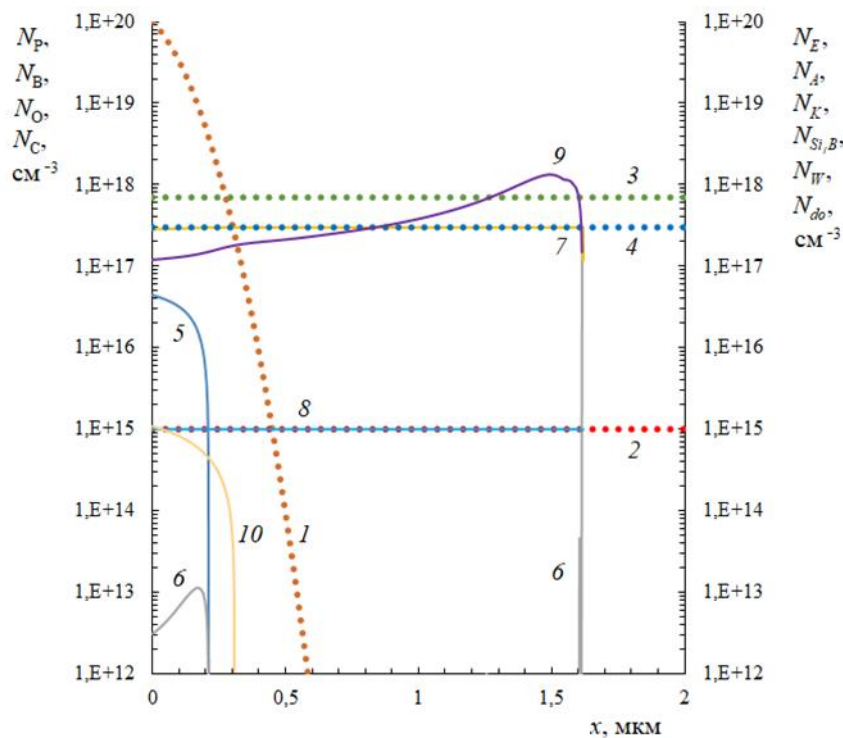


Рис. 1. Распределение концентраций примесей и ВРД в $n^+ - p$ переходе:

1 – N_P , 2 – N_B , 3 – N_O , 4 – N_C , 5 – N_E , 6 – N_A , 7 – N_K , 8 – N_{SiB} , 9 – N_W , 10 – N_{do}

На рис. 1 линии, соответствующие начальной концентрации примесей, показаны точками. Из полученных результатов следует, что $N_P \gg N_E$, $N_B = N_{SiB}$, $N_C = N_K$, т.е. примесные атомы бора связаны в комплексы Si_B , углерода – в комплексы Si_C . Концентрация атомов кислорода $N_O \gg N_A$ при $x < 1,614 \text{ мкм}$.

Максимальное значение $N_A \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $x = 1,617 \text{ мкм}$. Основными ВРД являются дивакансии и К-центры.

Концентрация ПРД (междоузельных атомов Si_I и вакансий V) много больше концентрации примесных атомов бора, кислорода и углерода в заданных условиях облучения. Поэтому при образовании ВРД важную роль играет процесс прямой аннигиляции междоузельного кремния и вакансий – быстрый процесс, а также их рекомбинация на междоузельном кислороде в соответствии с уравнениями (2, 3) – медленный процесс.

В результате облучения существенно изменяется примесный состав и, следовательно, внутреннее электрическое поле в ОПЗ $n^+ - p$ перехода. Эти эффекты играют отрицательную роль, являясь причиной деградации полупроводниковых приборов. С точки зрения инженерии радиационных дефектов, изменение времени переходных процессов облучённых $n^+ - p - p^+$ структур позволяет проектировать новые фотоэлектрические переключатели [11].

Список литературы

1. Челядинский А.Р. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии / А.Р. Челядинский, Ф.Ф. Комаров // Успехи физических наук. — 2003. — Т. 173. — № 8. — С.813 – 846.
2. Агафонов Ю.А. Влияние радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами в сильнолегированном слое, на характеристики кремниевых $n^+ - p - p^+$ структур / Ю.А. Агафонов, Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, В.И. Зиненко, А.И. Коваленко, М.С. Коваленко, Ф.А. Колоколов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2018. — № 10. — С. 86 – 91.
3. Богатов Н.М. Влияние радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами при температуре 83 К, на характеристики кремниевых фотоэлектрических структур / Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, А.И. Коваленко, М.С. Коваленко, Ф.А. Колоколов, Л.С. Лунин // Физика и техника полупроводников. — 2020. — Т. 54. — В. 2. — С. 144 – 149.
4. Богатов Н.М. Импульсные характеристики кремниевых фотоэлектрических преобразователей, облученных низкоэнергетическими протонами / Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, А.И. Коваленко, М.С. Коваленко, Л.С. Лунин // Письма в ЖТФ. — 2021. — Т. 47. — В. 7. — С. 10 – 12.

5. Вавилов В.С. Дефекты в кремнии и на его поверхности / В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. — М.: Наука, 1990. — 216 с.
6. Кузнецов Н.В. Радиационная стойкость кремния / Н.В. Кузнецов, Г.Г. Соловьев. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 96 с.
7. Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Кленевский А.В., Коваленко М.С. Моделирование областей разупорядочения в процессе радиационного дефектообразования / Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, А.В. Кленевский, М.С. Коваленко // Экологический вестник научных центров ЧЭС. — 2019. — Т. 16. — №1. — С. 59 – 65
8. Богатов Н.М. Моделирование образования первичных радиационных дефектов в кремнии при облучении низкоэнергетическими протонами / Н.М. Богатов, М.С. Коваленко // Моделирование неравновесных систем: Материалы XX Всероссийского семинара, 6 – 8 октября 2017 г. Красноярск. — Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН. — 2017. — С. 17 – 21.
9. Богатов Н.М. Радиационные дефекты в кремнии, выращенном методом Чохральского / Н.М. Богатов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 1999. — № 3. — С. 72 – 78.
10. Ziegler J.F. SRIM – The stopping and range of ions in matter / J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 2010. — V. 268. — P. 1818 – 1823.
11. Bogatov N.M. Analysis of the Effect of Radiation Defects by Low-energy Protons on Electrophysical Properties of Silicon $n^+p\text{-}p^+$ Structure / N.M. Bogatov, L.R. Grigoryan, M.S. Kovalenko, V.S. Volodin // Semiconductor Science and Information Devices. — 2023. — V. 5. — I. 1. — P. 18 – 25.

ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ И PLSR-МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.А. Большаков, Д.В. Емельянов

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук» Российская Федерация,
660037, г. Красноярск

Оперативная оценка влажности почвы представляет интерес для задач аграрного мониторинга, контроля состояния сельскохозяйственных земель и разработки методов дистанционной диагностики почвенного покрова. Традиционное гравиметрическое определение влажности обеспечивает высокую точность, однако связано с отбором образцов и лабораторной обработкой, что ограничивает возможность получения большого числа измерений в короткие сроки.

Одним из возможных способов ускорения оценки состояния почвы является использование её спектральной отражательной способности. Влажность оказывает выраженное влияние на оптические свойства поверхности: при увеличении содержания воды, как правило, снижается общий уровень отражательной способности и изменяется форма спектральной кривой [1-3]. При этом спектральный отклик формируется одновременно под воздействием гранулометрического состава, содержания органического вещества, окраски почвообразующей породы и других факторов. Вследствие этого количественная оценка влажности требует использования многомерных методов, способных анализировать большое число взаимосвязанных спектральных признаков.

Целью работы являлась оценка возможности определения влажности почвенных образцов по данным лабораторной спектроскопии с использованием регрессии методом частичных наименьших квадратов - PLSR.

В качестве исходного материала использованы данные модельного опыта, включавшего 17 вариантов почв в четырёхкратной повторности. Общая выборка включала 68 почвенных образцов. Исследованные образцы существенно различались по физическим и агрохимическим характеристикам. Содержание

гумуса изменялось от 0,37 до 8,50 %, физической глины - от 8,6 до 47,5 %. Реакция среды варьировала от слабокислой до щелочной. В опыте были представлены песчаные, супесчаные, легко-, средне- и тяжелосуглинистые разновидности почв. Такой диапазон свойств позволил оценивать зависимость спектрального сигнала от влажности в условиях выраженной неоднородности почвенного материала.

Спектральные измерения выполнялись в лабораторных условиях с использованием спектрорадиометра Flame-T-VIS-NIR-ES компании Ocean Optics. Рабочий диапазон прибора составляет 350-1000 нм. Перед измерениями выполнялась калибровка по белому эталону и темновому сигналу. Полученные спектральные данные сохранялись в текстовом формате и объединялись с результатами лабораторных измерений влажности.

Из-за повышенной шумности крайних участков спектра для дальнейшего анализа использовался диапазон 400-900 нм. Спектральная часть аналитической таблицы включала 2549 значений отражательной способности для каждого наблюдения.

Влажность образцов изменялась при искусственном увлажнении и последующем естественном иссушении. Для построения модели использовались стадии, для которых имелись сопоставленные значения гравиметрической влажности. Итоговый массив моделирования включал 408 наблюдений, соответствующих различным сочетаниям «почвенный образец - влажностное состояние».

В качестве целевой переменной использовалась массовая влажность почвы, выраженная в процентах. В качестве предикторов применялись значения отражательной способности в отдельных спектральных каналах.

Спектральные данные характеризуются выраженной мультиколлинеарностью, поскольку соседние длины волн содержат близкую информацию. В связи с этим для построения регрессионной зависимости использовался метод PLSR, позволяющий представить исходное многомерное пространство признаков через ограниченное число латентных компонент.

Перед обучением модели спектральные признаки стандартизировались. Оптимальное число латентных компонент составило 13.

Особое внимание уделялось схеме проверки модели. Поскольку для одного почвенного образца имелось несколько спектральных измерений при различной влажности, случайное построчное разделение данных могло привести к попаданию спектров одного и того же образца одновременно в обучающую и проверочную выборки. В этом случае оценка точности была бы завышена вследствие высокой спектральной близости повторных наблюдений.

Для устранения данного эффекта использовалась групповая кросс-валидация по идентификатору почвенного образца. Все измерения одного образца при любом влажностном состоянии относились только к одной группе и не разделялись между обучающей и тестовой частями. Таким образом, качество модели оценивалось по способности прогнозировать влажность для почвенных образцов, не использованных при соответствующем цикле обучения.

Для оценки точности применялись коэффициент детерминации R^2 , среднеквадратичная ошибка RMSE и средняя абсолютная ошибка MAE:

$$R^2 = 1 - \Sigma(y_i - \hat{y}_i)^2 / \Sigma(y_i - \bar{y})^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{1/n \cdot \Sigma(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

$$MAE = 1/n \cdot \Sigma|y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

где y_i - фактическое значение влажности; $\hat{y}_i$ - прогноз модели; $\bar{y}$ - среднее фактическое значение влажности; n - число наблюдений.

Анализ спектральных данных показал закономерное изменение отражательной способности при изменении влагосодержания. При увлажнении в целом наблюдалось снижение спектральной яркости почвы, а при последующем высыхании - её постепенное увеличение. При этом абсолютная величина и характер изменения спектральной кривой различались между образцами, что связано с неодинаковым гранулометрическим составом, содержанием органического вещества и другими почвенными свойствами.

Построенная PLSR-модель показала достаточно высокую способность к количественной оценке влажности. По результатам групповой кросс-валидации коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,85$. Среднеквадратичная ошибка прогноза составила 3,31 процентного пункта влажности, средняя абсолютная ошибка - 2,61 процентного пункта.

Таблица 1.

Показатели качества PLSR-модели влажности почвы

Показатель	Значение
R^2	0,85
RMSE, процентных пункта	3,31
MAE, процентных пункта	2,61
Число латентных компонент	13

Полученное значение R^2 показывает, что спектральными предикторами объясняется около 85 % вариации влажности в рассматриваемой выборке. Значение MAE свидетельствует, что типичное абсолютное расхождение фактического и рассчитанного влагосодержания составляло около 2,6 процентного пункта.

Полученные результаты показывают, что влияние влаги достаточно выражено представлено в спектральной кривой даже при использовании ограниченного диапазона 400-900 нм. При этом зависимость не сводится к изменению одного спектрального канала. Использование латентных компонент PLSR позволяет совместно учитывать вариацию большого числа взаимосвязанных участков спектра.

Применение групповой схемы кросс-валидации является существенным условием объективной оценки такой модели. При наличии серии измерений одного объекта обычное случайное разделение отдельных строк не обеспечивает статистической независимости обучающей и контрольной частей. Группировка по образцам снижает риск информационной утечки и позволяет оценивать способность модели работать на ранее не использованных почвенных образцах.

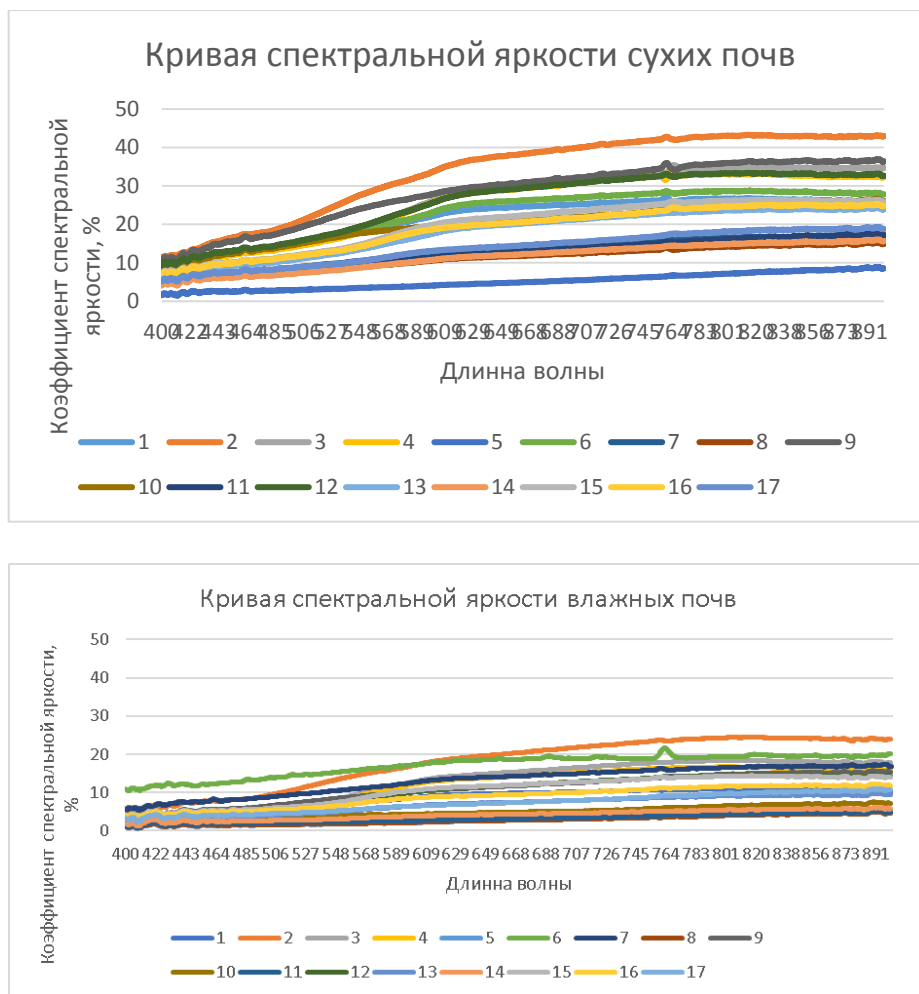


Рис. 1. Сопоставление фактических и прогнозируемых значений влажности почвенных образцов по данным групповой кросс-валидации.

Высокая чувствительность спектральной кривой к содержанию воды имеет двойное значение. С одной стороны, она позволяет рассматривать лабораторную спектрометрию как инструмент количественной диагностики влажности. С другой стороны, влажность является потенциальным мешающим фактором при спектральном прогнозировании относительно постоянных свойств почвы - содержания гумуса, гранулометрического состава и агрохимических показателей.

Поэтому полученная модель влажности представляет собой один из этапов формирования комплексного подхода к спектральной диагностике почв. Последующие исследования должны включать анализ устойчивости моделей других почвенных свойств при изменении влажностного состояния и оценку необходимости явного учёта влажности при их построении.

Практическое применение лабораторной модели непосредственно в полевых условиях требует отдельной проверки. В реальном почвенном покрове спектральный сигнал дополнительно зависит от шероховатости и комковатости поверхности, растительных остатков, теней, условий освещения и пространственной неоднородности. В связи с этим дальнейшее развитие исследования связано с независимой валидацией модели и оценкой возможности переноса выявленных закономерностей на данные полевой спектрометрии и дистанционного зондирования.

Таким образом, использование спектральной отражательной способности в сочетании с PLSR позволило построить количественную модель влажности почвенных образцов с коэффициентом детерминации 0,85, RMSE 3,31 и MAE 2,61 процентного пункта. Групповая кросс-валидация по идентификаторам образцов обеспечивает более строгую оценку обобщающей способности модели при наличии повторных спектральных измерений. Полученные результаты подтверждают перспективность многомерного спектрального моделирования влажности и создают методическую основу для последующего анализа влияния водного режима на точность оценки других свойств почвы.

Список литературы

1. Орлов Д.С., Суханова Н.И., Розанова М.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. - М.: МГУ, 2001. - 176 с.
2. Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю., Грубина П.Г. Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. - 2023. - Вып. 115. - С. 129-159.
3. Savin I.Y., Vindeker G.V. Some specifics in using optical properties of soil surface for moisture detection // Eurasian Soil Science. - 2021. - Vol. 54. - No. 7. - P. 1019-1027.
4. Большаков С.А., Ерунова М.Г., Шпедт А.А. Использование почвенных индексов и данных мультиспектральной съемки БПЛА для дифференциации типов почв // Южно-Сибирский научный вестник. - 2025. - № 6 (64). - С. 173-178.

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОЁМА НА ЛЕСТНИЧНУЮ КЛЕТКУ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭВАКУАЦИИ

Т. Б. Витова¹, Е. С. Кирик²

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, vitova@icm.krasn.ru

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, kirik@icm.krasn.ru

Лестницы – обязательный элемент любого многоэтажного здания. На лестницах происходит слияние людских потоков: идущие по лестничному маршу и выходящие с этажа образуют единый поток. Движение по лестницам даже в штатном режиме требует большей осторожности, чем при движении по горизонтальным участкам. При этом лестницы являются частью эвакуационного пути из зданий и сооружений. Как правило, они защищены от попадания дыма и других опасных факторов пожара. Во время пожара или иного чрезвычайного происшествия людям необходимо как можно быстрее попасть на лестничную площадку, поэтому быстрый и беспрепятственный переход с этажа на лестницу – важная задача.

В работе рассматривается моделирование движения людей по лестницам в зависимости от расположения проёма с этажа на лестничную клетку. При исследовании движения людей по лестницам используются существующие лестничные площадки в зданиях и сооружениях. Это накладывает определенные ограничения на результаты. Невозможно посмотреть другие конфигурации зданий с лестницами. С помощью моделирования движения людей можно исследовать любые конфигурации зданий.

Цель работы – найти наиболее эффективный вариант расположения выхода с этажа на лестничную клетку с точки зрения времени эвакуации. Эффективность определяется через интенсивность движения в проёме с этажа на лестничную площадку.

Для исследований используется модуль SigmaEva из расчетно-аналитического комплекса «Сигма ПБ», в основе которого лежит дискретно-непрерывная модель движения людей [1,2].

Дискретно-непрерывная модель движения людей

Движение людей (частиц) рассматривается на плоскости, пространство моделирования $\Omega \in R^2$. Геометрия пространства известна частицам и отражена в «карте местности» – поле расстояний s . Значения поля – кратчайшие расстояния от текущей точки о выхода. Частицы представляются в виде плоских круглых несжимаемых дисков. В начальный момент времени t_0 их положение задаётся координатами центров дисков $x_i(0) = (x_i^1(0), x_i^2(0))$, $i = \overline{1, N}$, N – количество частиц. Каждой частице i приписывается: выход k и, соответственно, поле s_i^k , скорость свободного движения v_i^0 м / с, площадь горизонтальной проекции P_i , м².

В момент времени t частица может переместиться в одном направлении $e_i(t) \in \{e_i^\alpha(t), \alpha = \overline{1, q}\} = \left\{ \left(\cos \frac{2\pi\alpha}{q}, \sin \frac{2\pi\alpha}{q} \right), \alpha = \overline{1, q} \right\}$, q – количество возможных направлений, α – номер направления.

Направление движения частицы на каждом расчётном шаге – случайная величина. Пусть $p_i^\alpha(t)$ – вероятность сдвинуться в направлении $e_i^\alpha(t)$ для частицы i на шаге t . При вычислении $p_i^\alpha(t)$ учитывается поле расстояний до выхода s , плотность расположения частиц и близость стен в рассматриваемом направлении $e_i^\alpha(t)$. Влияние поля s , плотности частиц и стен контролируется соответствующими параметрами модели $k_s > 0$, $k_p > 0$, $k_w > 0$ в пределах радиуса видимости r . Параметры модели регулируют характер движения частиц, изменяя его от строго направленного к цели до случайного блуждания. На основе ряда распределения $p_i^\alpha(t)$ выбирается направление для перемещения $e_i^{\hat{\alpha}}(t)$, $\hat{\alpha}$ – номер выбранного направления.

Скорость свободного движения, площадь проекции частицы, другие параметры модели могут задаваться индивидуально для каждой частицы или быть одинаковыми для всех.

Новое положение частицы в момент времени t определяется как:

$$\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_i(t - \Delta t) + v_i(t) \mathbf{e}_i(t) \Delta t,$$

Δt – временной шаг и $\Delta t = 0,25$ с; $x_i(t - \Delta t)$ – координата в предыдущий момент времени; $e_i(t)$ – направление движения; $v_i(t)$ – скорость движения в направлении $e_i(t)$.

Скорость движения на каждом временном шаге не может быть выше заданной скорости свободного движения v_0 , зависит от плотности расположения частиц $\rho_i^{\hat{\alpha}}(t)$ в направлении $e_i^{\hat{\alpha}}(t)$ и определяется по заранее заданному закону (например, [3,4,5]). Далее используется зависимость скорости от плотности с параметрами $a = 0,295$, $\rho_0 = 0,51$ [1/м²] для горизонтального участка пути [3]:

$$v(\rho) = \begin{cases} v^0(1 - a \ln \frac{\rho}{\rho_0}), & \rho > \rho_0; \\ v^0, & \rho \leq \rho_0. \end{cases} \quad (1)$$

Движение по лестничным маршам и межэтажной площадке рассчитывается так, как если бы это был горизонтальный участок пути, но с учетом изменения скорости в соответствии с формулой (1). Параметры для движения по лестнице вниз $a = 0,4$, $\rho_0 = 0,89$ [1/м²], по лестнице вверх $a = 0,305$, $\rho_0 = 0,67$ [1/м²] [3].

Эксперименты и результаты

Исследуется пять одинаковых лестниц. Единственное различие в расположении выхода на лестничную клетку с этажа, рис. 1. Движение происходит сверху вниз. Процесс слияния людей и, соответственно, динамика движения рассматриваются в зависимости от расположения проема на лестничную клетку. Люди расположены на 10 этажах. Ширина проёма с этажа на лестницу одинакова для всех вариантов и равна 90 см. На каждом этаже равномерно размещается по 100 или по 25 человек в области 9 м на 15 м. Скорость свободного движения $v_0 = 1,66$ [м/с], площадь проекции человека 0,1 м².

Замеряется время движения через проём с этажа на лестничную площадку – разница между моментом входа первого человека и выходом последнего, T_{cp} . По полученному времени вычисляется интенсивность движения через проём (удельный поток):

$$J_s = \frac{N}{b T_{cp}},$$

где N – количество людей, прошедших через проём, $T_{\text{ср}}$ – время движения через проём (рассматривается среднее время движения по 10 экспериментам), b – ширина проёма. На рис. 2 и 3 представлены полученные результаты. Показано изменение удельного потока в зависимости от этажа и типа лестницы. Зеленым цветом отдельно обозначен удельный поток для лестницы типа V2, так как этот вариант дает наименьшее значение практически всегда. Данный пример характеризуется необходимостью немедленного поворота при переходе с этажа на лестничную площадку; при этом движение осложняется встречным потоком людей, уже находящихся на лестнице.

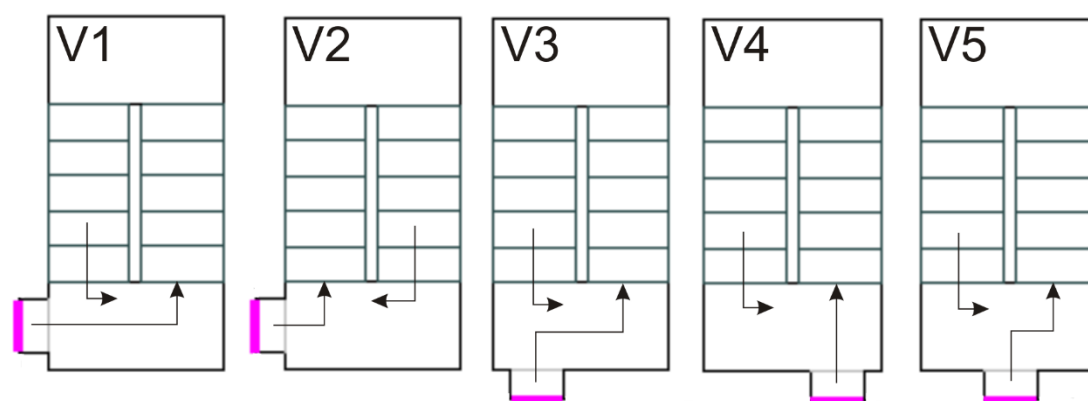


Рис. 1. Варианты расположения выходов с этажа на лестничную площадку и виды слияния людских потоков. Стрелками показано направление движения людских потоков при движении сверху вниз по лестнице, проём выделен цветом

Разберем случай, когда количество людей на каждом этаже составляет $N=25$ человек, рис. 2. Величина удельного потока J_s варьируется в диапазоне приблизительно от 1,7 до 2,05 1/(м с) для всех этажей и для вариантов V1, V3-V6, в то время как для варианта V2 удельный поток не выходит за пределы 1,7 1/(мс). Для одного и того же типа лестницы J_s практически не зависит от номера этажа. Через проём на лестницу всегда выходит стабильный поток людей, не возникает заторов и задержек движения на этажах. Люди, уже движущиеся по лестнице, не препятствуют выходу людей с этажа.

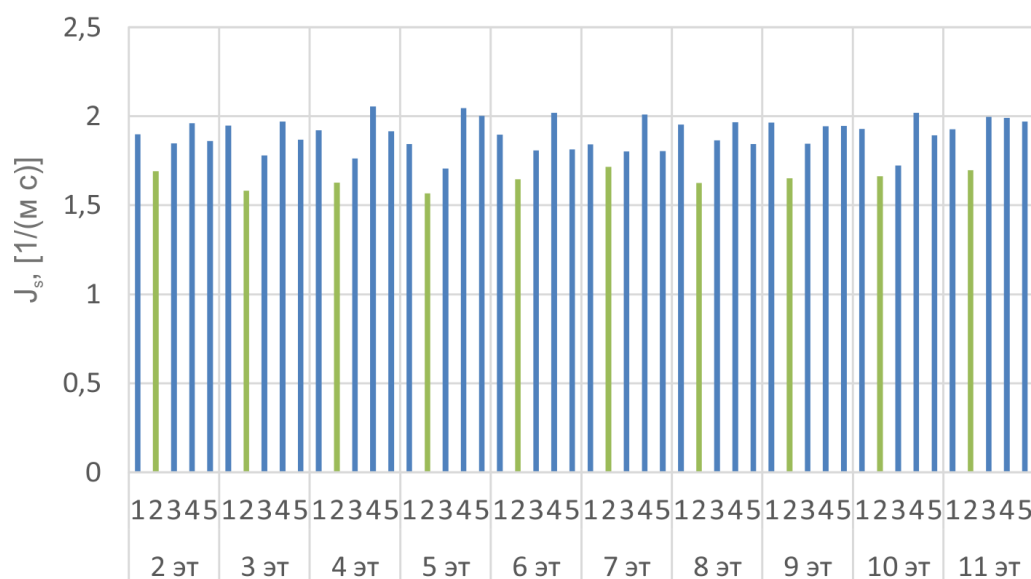


Рис. 2. Количество людей на каждом этаже: $N=25$ человек. Удельный поток для проёма с этажа на лестничную площадку для каждого варианта расположения выхода: 1=V1, 2=V2, 3=V3, 4=V4, 5=V5. Зеленым обозначен удельный поток для лестницы типа V2

Теперь рассмотрим случай, когда количество людей на каждом этаже $N=100$ человек, рис. 3. Данный пример является экстремальным и позволяет продемонстрировать наихудший вариант конфигурации выхода на лестничную площадку с точки зрения пропускной способности. Значения J_s изменяются от 0,3 1/(мс) до 2,13 1/(мс) для вариантов лестниц V1, V3-V6, для V2 J_s понижается до 0,22 1/(мс). При переходе с 11-го на 10-й этаж наблюдается значительное изменение удельного потока – снижается примерно в 4 раза и больше по всем типам лестниц (кроме V2). Вариант лестницы V2 снова дает наименьший результат.

Максимальная интенсивность движения (предел пропускной способности проёма) в дверном проёме $q_{max} = 19,6$ м/мин [3]. С учетом принятой в модели площади проекции $0,1 \text{ м}^2$ человека, равна $\approx 3,26$ 1/(мс) ($= 19,6 \text{ [м/мин]} / 0,1 \text{ [м}^2\text{]} / 60 \text{ [мин]}$). Результаты моделирования демонстрируют, что значения удельного потока не превосходят q_{max} . Потоки в модели не движутся быстрее потоков в реальности, т.е. модель позволяет оценивать время эвакуации с запасом [6].

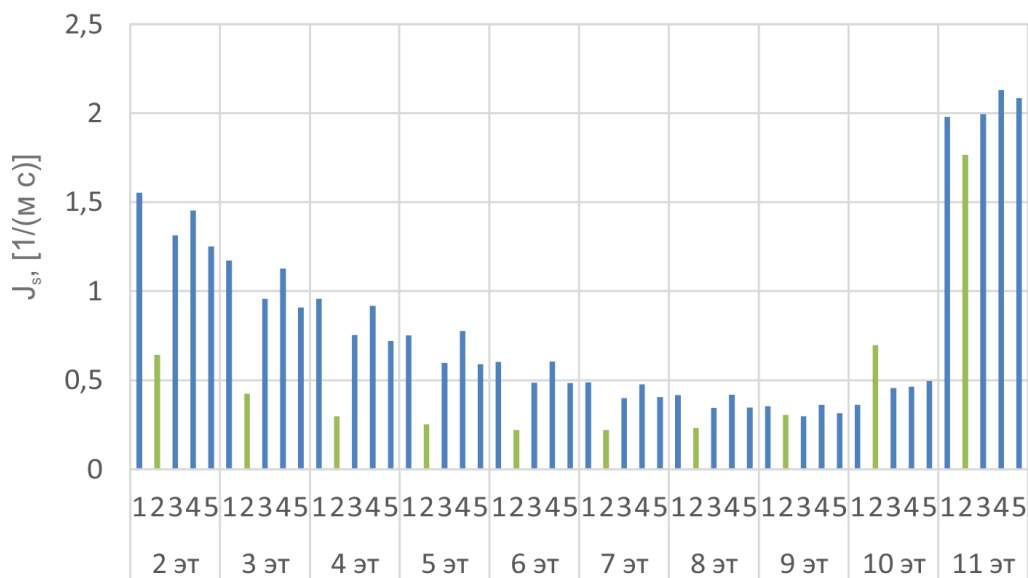


Рис. 3. Количество людей на каждом этаже: $N=100$ человек. Удельный поток для проёма с этажа на лестничную площадку для каждого варианта расположения выхода: 1=V1, 2=V2, 3=V3, 4=V4, 5=V5. Зеленым обозначен удельный поток для лестницы типа V2.

Зафиксированное снижение удельного потока через проём для лестницы типа V2 в сравнении с остальными рассматриваемыми типами лестниц свидетельствует о наличии затруднений в организации движения.

Заключение

Результаты вычислительного эксперимента, выполненного для вариантов, представленных на рис. 1, показывают: геометрические параметры лестничной клетки оказывают существенное влияние на продолжительность эвакуации с этажей при высокой плотности людского потока. В условиях низкой плотности потока конфигурация рассматриваемых лестничных узлов практически не влияет на время эвакуации.

Определяющими факторами динамики движения выступают направления перемещения людей – как при выходе с этажа, так и при движении по лестнице – в зоне их слияния. По данным эксперимента, вариант V2 следует признать наименее удачным с точки зрения организации эвакуационного пути: он характеризуется максимальной продолжительностью покидания этажей.

Список литературы

1. Кирик Е. С. Математическое моделирование эвакуации при пожаре / Е. С. Кирик, А. А. Дектерев, К. Ю. Литвинцев, Е. Б. Харламов, А. В. Малышев // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26, № 1. – С. 3-16.
2. Kirik E. On the evacuation module SigmaEva based on a discrete-continuous pedestrian dynamics model / E. Kirik, A. Malyshev, M. Senashova // Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the 11th International conference “Parallel processing and applied mathematics”. – 2016. – V.9574. – P.539-549.
3. Холщевников В. В. Эвакуация и поведение людей при пожарах: учебное пособие / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин, А. П. Парфененко, И. С. Кудрин, Р. Н. Истратов, И. Р. Белосохов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 262 с.
4. Weidmann U. Transporttechnik der Fussganger. Transporttechnische Eigenschaften des Fussgangerverkehrs (Literaturauswertung)/ U. Weidmann. – Zurich: IVT, Institut fur Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassenund Eisenbahnbau, 1992. – 110 p.
5. Nelson H. E. Emergency Movement / H. E. Nelson, F. W. Mowrer // The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. – National Fire Protection Association. 2002. – P. 3-367 – 3-380.
6. Кирик Е.С., Витова Т.Б. Анализ данных натурных экспериментов пешеходного движения в прямом коридоре и их применение для тестирования программ на примере ПО «Сигма ПБ» / Е.С. Кирик, Т.Б. Витова // Пожарная безопасность. – 2020. – N 2. – С. 51-62.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БУФЕРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ КЛЮЧЕВОГО СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Л.Р. Григорьян, Н.М. Богатов, Р.Л. Григорьян, М.С. Коваленко

Кубанский государственный университет,

leonmezon@mail.ru

Фундаментальной основой научного постижения реальности выступает анализ физических явлений, дающий возможность с высокой точностью зафиксировать характеристики исследуемого объекта. В процессах информационного обмена, подразумевающих трансляцию данных от отправителя к адресату, ключевая роль отводится электрическим сигналам. В данной системе роль информационного носителя выполняют динамические колебания напряжения или силы тока в цепи. В современной метрологии регистрация параметров таких сигналов является наиболее востребованной задачей, для решения которой задействуются разнообразные конфигурации измерительных трактов [1].

Ключевым фактором, ограничивающим порог чувствительности селективных измерительных комплексов, выступают характеристики первичных преобразователей. Именно эти узлы отвечают за линейную фильтрацию и последующую трансформацию поступающего сигнала $y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t - \tau)d\tau$ или $y(t) = \int_0^t h(\tau)x(t - \tau)d\tau$, где $x(\tau)$ – входной сигнал; $y(t)$ – выходной сигнал; $h(t, \tau)$ – импульсная реакция или весовая функция [2].

Для осуществления данного преобразования целесообразно задействовать селективные фильтры, характеризующиеся импульсной характеристикой вида $h(\tau) = e^{-\alpha\tau} \sin \omega_0 \tau$, где α – определяет скорость затухания. Альтернативным подходом является использование синхронного детектирования, при котором на входной сигнал воздействует периодическая весовая функция, генерируемая на основе опорного колебания.

В настоящем исследовании детально рассматриваются схемотехнические аспекты реализации измерительного тракта, базирующегося на методе ключевого

синхронного детектирования [3]. Особое внимание уделено анализу входных буферных каскадов, выполняющих функцию преобразования гармонического сигнала в прямоугольный, а также оценке их погрешностей в контексте последующей оцифровки сигнала с использованием аналого-цифрового преобразования.

Цель исследования – моделирование амплитудных и амплитудно-фазовых характеристик усилителей-ограничителей.

Ключевой задачей при проектировании усилителей-ограничителей является формирование выходного сигнала прямоугольной формы с максимально крутыми фронтами, которые должны быть жестко синхронизированы с моментами перехода входного сигнала через нулевой уровень. Процесс амплитудного ограничения неизбежно влечет за собой расширение спектрального состава сигнала. В идеале каждый усилительный каскад должен функционировать как линейный четырехполюсник, не вносящий искажений, что невозможно реализовать на практике. В действительности любые электронные цепи характеризуются неравномерной амплитудно-частотной характеристикой и вносят фазовые искажения, так как сдвиг фаз не является строго линейной функцией частоты [4].

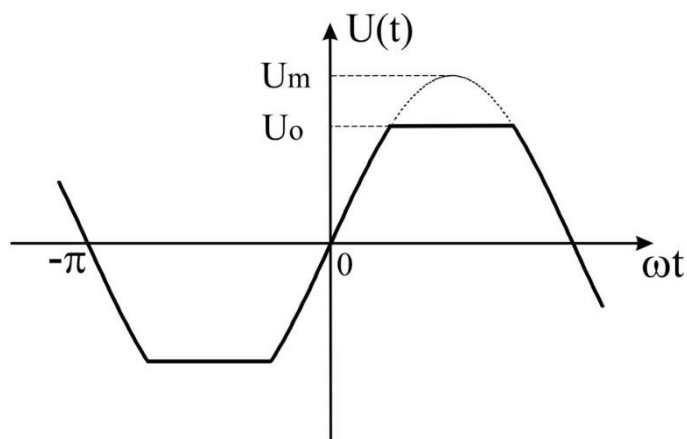


Рис. 1 – Характерный выходной сигнал усилителя-ограничителя

Искажение формы выходного сигнала в усилителе-ограничителе приводит к временному сдвигу момента перехода через ноль относительно аналогичного параметра входного гармонического колебания. В связи с этим для проектирования подобных устройств с заданными характеристиками требуется

математический расчет фазовой ошибки, учитывающий влияние ширины полосы пропускания и глубины ограничения сигнала.

Ограниченный сигнал (рисунок 1), получаемый на выходе усилителя-ограничителя, изменяет свои параметры (амплитуду и фазу) относительно первоначального.

Уравнение выходного сигнала (рисунок 1), при коэффициенте передачи $K = 1$ и напряжении ограничения U_0 , можно задать следующей формулой:

$$U_{\text{вых}} = \begin{cases} U_m, & U_m < U_0 \\ U_0, & U_m \geq U_0 \end{cases}.$$

В источнике [5] предложен подход к моделированию усилительного устройства как каскадного соединения безынерционного идеального ограничителя и RC-цепочки, обладающей интегрирующими или дифференцирующими свойствами. Данная модель наиболее адекватно описывает работу усилителей-ограничителей, построенных на базе токовых переключателей и стандартных усилительных каскадов [5].

Более перспективным является применение радиотехнического подхода в специализированной программе САПР Micro-Cap [6], с целью выявления всех дестабилизирующих факторов и их оценки на конечную погрешность преобразования сигнала.

Для реализации функции ограничения рассмотрим классическую схему усилителя ограничителя (рисунок 2), в которой входной синусоидальный сигнал с $U_m = 5$ В и частотой $f = 200$ Гц ограничивается по уровню на двух встречноключенных стабилитронах, включенных в обратную связь инвертирующего усилителя.

Для моделирование зададим следующие параметры: ограничение по уровню – $U_0 = 3,3$ В (соответственно стабилитроны типа 1N4728), в качестве операционного усилителя – ультра прецизионный OP177G ф. Analog Devices. Полоса преобразования – до 1 МГц. Коэффициент передачи $K = 1$, при этом $R1 = R2 = R$.

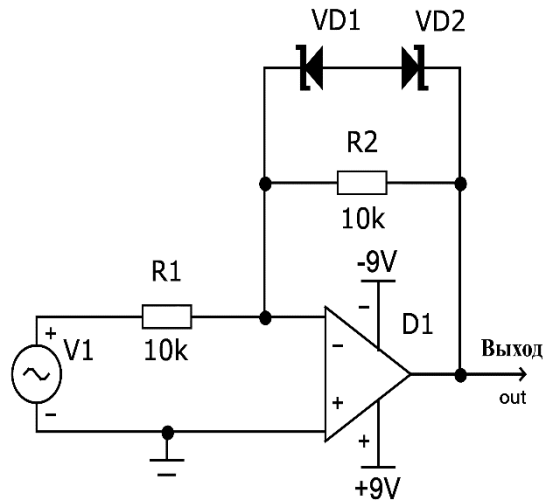


Рис. 2. Классическая схема усилителя-ограничителя на двух стабилитронах.

На графиках (рисунок 3) представлены результаты моделирования входных и выходных сигналов. Анализ показывает, что в процессе преобразования фаза сигнала сдвигается на 180° , однако моменты пересечения нулевого уровня остаются неизменными. Данная инверсия не создает ограничений для использования в системах синхронного детектирования, поскольку идентичные усилители-ограничители задействованы в обоих трактах — как в опорном, так и в измерительном. В условиях идеальной модели (при отсутствии погрешностей) такой фазовый сдвиг не оказывает влияния на итоговую функцию преобразования.

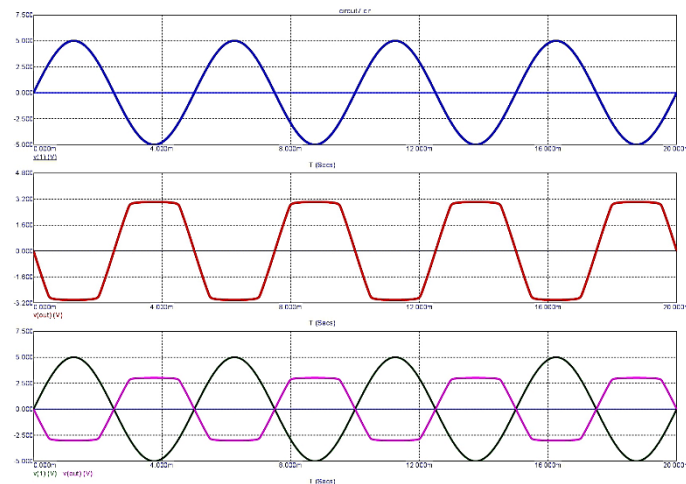


Рис. 3. Эпюры моделирования преобразования сигналов: $V(1)$ – входной сигнала, $V(out)$ – выходной сигнала.

С целью исследования зависимости фазово-частотной характеристики $ph(V(out))$ от номиналов резистивных элементов при фиксированном

коэффициенте усиления $K = 1$, был выполнен ряд расчетов с варьированием параметров сопротивлений. На рисунке 4, представлены семейство фазочастотных характеристик $ph(V(out))$ усилителя-ограничителя при вариации сопротивления $R_1 = R_2 = R$ от 500 Ом до 100 кОм в диапазоне частот от 1 Гц до 1 МГц. В таблице 1 представлены данные фазового сдвига сигнала от частоты для некоторых значениях сопротивления R .

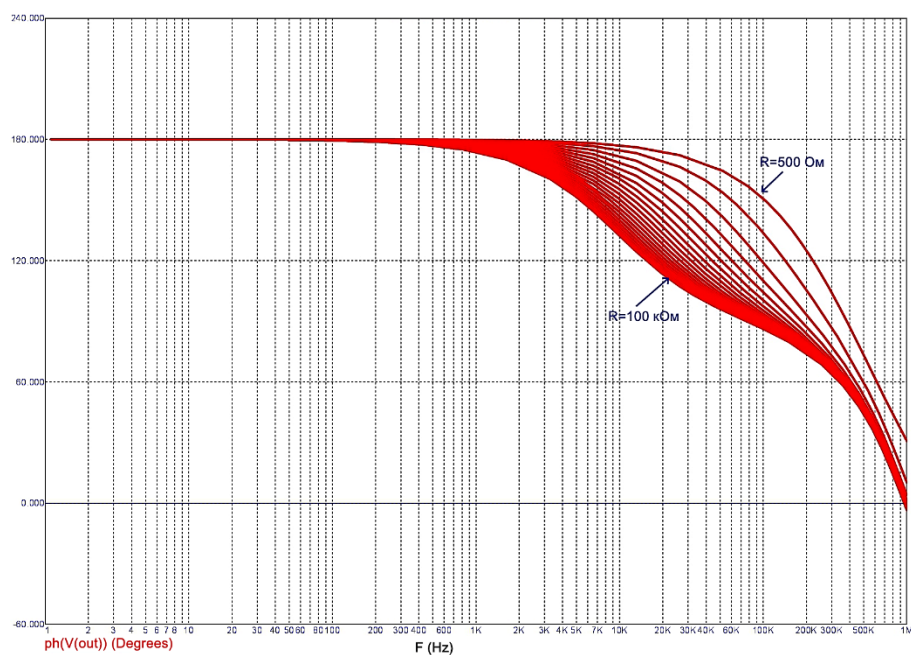


Рис. 4. Семейство графиков фазочастотной зависимости $ph(V(out))$ от частоты f при изменении R от 500 Ом до 100 кОм.

Таблица 1.

Зависимость $ph(V(out))$ в градусах для стандартного набора частот f и при вариации R .

R (Ом) f (частота)	500 Ом	5 кОм	10 кОм	25 кОм	50 кОм	100 кОм
500 Гц	179,899	179,736	179,587	179,135	178,381	176,893
10 кГц	176,987	174,744	171,809	163,280	150,381	132,275
25 кГц	172,480	166,970	160,016	142,315	124,035	108,449

100 кГц	150,656	133,858	119,155	101,246	91,495	86,248
500 кГц	73,320	60,393	53,333	47,597	45,419	44,227
1 МГц	30,726	10,155	4,077	- 0,644	- 2,432	- 3,363

Как видно из графиков и таблицы, при увеличении R , происходит резкое изменение фазы сигнала в области частот от 1 кГц. Данное явление связано как с характеристиками стабилитронов (зависимости сопротивления и емкости р-п перехода от частоты), так и с выбором схемы преобразования, в которой отсутствуют корректирующие частотные цепочки, с целью недопущения амплитудно-фазовой погрешности. Кроме того, в области 1 МГц и при $R > 25\text{кОм}$ происходит сдвиг более чем на 180° градуссов.

На основе проведенного моделирования можно заключить, что:

- применение усилителя-ограничителя на основе классической схемы с двумя стабилитронами возможно в схемах синхронного детектирования, при этом необходимо ограничить выбор сопротивления районом 10 кОм, что позволит с одной стороны иметь высокое входное сопротивление, а с другой возможность работы в области частот до 1 МГц;

- нелинейный характер фазочастотной характеристики определяется включением двух стабилитронов в цепь обратной связи операционного усилителя, что приводит инверсии сигнала при больших значениях R ;

- основная погрешность работы усилителя-ограничителя связана с выбором и разбросом параметров как стабилитронов $VD1$ и $VD2$, так и резисторов $R1$ и $R2$. Поскольку современные промышленные резисторы обладают прецизионной точностью (до $\pm 0,001\%$) и практически не подвержены температурному дрейфу, ключевым фактором, определяющим расхождение характеристик между измерительным и опорным усилителями-ограничителями, становится погрешность установки напряжения U_0 . В свою очередь, этот параметр напрямую лимитируется допуском на напряжение стабилизации используемых стабилитронов. Известно, что в диапазоне напряжений от 1,5 до 4 В точность качественных стабилитронов составляет 0,5% и только в области от 6,2 до 7,5 В – 0,01% (физически в этой зоне кремниевые переходы имеют нулевой

температурный коэффициент), поэтому с учетом, что каналов два, минимальная погрешность составит 1%, следовательно, погрешность синхронного детектирование составит не менее 1 %, и это необходимо учитывать в практической реализации.

Список литературы

1. Ж. Макс Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир. 1983. 556 с.
2. Рыбин Ю.К., Будейкин В.П. Синхронные детекторы в селективных измерительных приборах // Измерения, контроль, автоматизация. 1984. № 3(51). С. 53–61.
3. Петин З.Г. Ключевой синхронный детектор. Схемотехника. №3. 2008 г. с.14-15.
4. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Додэка-XXI. 2015. 528 с.
5. Григорьян Р.Л. и др. Анализ амплитудно-фазовой погрешности усилителей-ограничителей гармонических сигналов. Техника средств связи. Серия Радиоизмерительная техника. – 1980. Вып. 7.
6. Амелина, М.А., С. А. Амелин, С.А. Программа схемотехнического моделирования. Micro-Cap. Версии 9, 10: учебное пособие для вузов / — 4 е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2024. - 632 с.

СОЗДАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО АРХИВА ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ERA5 ДЛЯ ЮГА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

А.В.Дергунов¹, К.В.Краснощеков¹, А.В.Токарев²

¹Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
СО РАН», alexdergunov@icm.krasn.ru

²Институт вычислительного моделирования СО РАН

Детальные и продолжительные ряды метеорологических данных с высоким пространственным и временным разрешением востребованы в самых разных областях — от экологического мониторинга и численного моделирования атмосферы до сельского хозяйства и дистанционного зондирования Земли [1, 2]. Для решения таких задач всё чаще используются продукты реанализа, объединяющие результаты численного моделирования с данными наблюдений и обеспечивающие согласованные во времени и пространстве поля атмосферных параметров.

Одним из наиболее полных и широко применяемых источников такой информации является реанализ ERA5, предоставляемый Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) через сервис Copernicus Climate Data Store (CDS) [3]. Реанализ ERA5 охватывает период с 1940 года по настоящее время, имеет почасовое временное разрешение и пространственное разрешение до 0,1° (для набора ERA5-Land), что делает его удобным инструментом для широкого круга прикладных и исследовательских задач.

Основные направления использования подготавливаемого архива:

1. Экологические задачи и моделирование атмосферы. Для города Красноярска, расположенного в котловине и характеризующегося сложными условиями рассеивания примесей, особенно актуальны анализ температурных инверсий, застойных явлений и периодов повышенного загрязнения воздуха. Детальные поля температуры, ветра и влажности на разных высотах позволяют исследовать механизмы формирования инверсий и оценивать их связь с уровнями загрязнения.

2. Сельское хозяйство. Метеорологические данные необходимы для оценки агроклиматических ресурсов, расчёта сумм активных температур,

влагообеспеченности, сроков сева и уборки, моделирования продуктивности сельскохозяйственных культур.

3. Совместный анализ с данными ДЗЗ и наземных измерений.

Однако практическое использование ERA5 сопряжено с рядом трудностей: большие объёмы данных, ограничения сервера MARS и лимиты на количество запросов. В связи с этим возникает необходимость разработки эффективной методики загрузки, категоризации и хранения метеоинформации применительно к конкретному региону.

Цель работы – создание полного локального архива метеорологических данных реанализа ERA5 для города Красноярска и прилегающих районов, предназначенного для решения задач моделирования и анализа состояния атмосферы, изучения периодов возникновения температурных инверсий, а также для использования в сельском хозяйстве и совместно с данными спутниковых, подспутниковых и наземных измерений.

Для создания архива ERA5 использовались три набора подробных данных:

1. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present – содержит почасовые данные об атмосферных, океанических и поверхностных параметрах (всего 268 параметров). Пространственное разрешение составляет 0.25 градуса, временное разрешение – почасовые данные. Примеры параметров из набора: плотность снежного покрова, высота нижней границы облаков, порывы ветра на 10-и метрах от поверхности, среднее давление на уровне моря, общее количество осадков и другие.

2. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present – это набор данных, состоящий из 22 метеорологических параметров, которые представлены на изобарических поверхностях (уровнях давления) от 1000 мбар до 1 мбара (всего 37 вертикальных уровней). Пространственное разрешение составляет 0.25 градуса, временное разрешение – почасовые данные. В набор входят такие параметры, как температура воздуха, две компоненты скорости ветра, относительная влажность, геопотенциал и другие.

3. ERA5-Land hourly data from 1950 to present – данные о поверхности Земли на регулярной сетке с высоким пространственным разрешением 0.1 градуса.

Временное разрешение – почасовые данные. Содержит ограниченное количество параметров, относящихся к суше и её приповерхностному слою, поскольку создается путем использования только наземного компонента глобальной модели реанализа ERA5. Пример параметров: температура почвы на 4-х вертикальных уровнях, температура поверхности, температура воздуха на 2-х метрах, две компоненты ветра на 10-ти метрах, испарение с поверхности почвы, альбедо и так далее.

Метеоинформация реанализа ERA5 выгружается с максимальным временным разрешением. Пространственный охват был ограничен координатами: от 47 до 63 градусов северной широты и от 80,5 до 113 градусов восточной долготы.

Загрузка данных ERA5 осуществляется с агрегацией по месяцу для наборов ERA5 data on single levels и ERA5 data on pressure levels, а набор ERA5-Land загружается посуточно.

Все параметры так или иначе разделяются на мгновенные, анализ, накопленные и прогнозные. Отличие заключается в методике их расчета и привязке к временной шкале. Поскольку реанализ ERA5 запускается два раза в сутки в 00 и в 12 часов по UTC, то от этих временных точек инициализации модели запускается отчет для прогнозных данных (осадки, облачность) и часы накопления для накопительных параметров, таких как количество выпавших осадков, испарение и прочее. Смешивание разных типов параметров в одном файле нужно избегать из-за разной временной сетки.

Поэтому была разработана схема загрузки с разделением метеопараметров по категориям. Набор ERA5 data on single levels имеет 8 категорий параметров, набор ERA5 data on single levels имеет 3 категории параметров, набор ERA5-Land имеет 6 категорий параметров. Данные набора ERA5 data on pressure levels загружались для 12-ти вертикальных уровней (от 1000 мбар до 700 мбар), что обеспечивает анализ в слое от нижней тропосферы до поверхности земли.

Скачивание данных производилось с помощью скриптов на языке программирования Python с использованием официальной библиотеки «cdsapi». Исходные скрипты загрузки модифицировались для автоматической разбивки

загружаемых данных по уровню агрегации и категориям параметров с проверкой уже загруженных данных и возможностью продолжения загрузки после непредвиденного обрыва соединения или иных обстоятельств, при которых загрузка могла быть прервана.

Несмотря на проведенные работы по оптимизации алгоритма загрузки, данные реанализа ERA5 выгружаются очень долго. Причины – периодически нестабильное интернет-соединение, большая нагрузка на серверы MARS, большой объем данных и количество запросов. Загрузка самого объемного набора данных ERA5 data on single levels за один год занимает в среднем трое суток. Примерно столько же идет загрузка данных ERA5-Land, поскольку они агрегированы по суткам. Одновременно загружать данные из разных наборов с одной машины малоэффективно, к тому же есть риск обрыва соединения со стороны разработчика данных из-за чрезмерно большого количества запросов на загрузку с одного аккаунта.

Поскольку модель GFS (Global Forecast System) Национального центра прогнозирования окружающей среды США (NCEP — National Centers for Environmental Prediction) [4] давно используется в наших исследованиях, была поставлена задача сопоставить значения ряда метеопараметров, полученных по этой модели, с загруженными данными реанализа ERA5 для территории города Красноярска. В качестве сравниваемых параметров, значимых для экологической обстановки города, были выбраны температура воздуха на разных высотах, а также скорость и направление ветра за зимний период с 1 декабря 2022 года по 28 февраля 2023 года.

Проведено сравнение значений температуры поверхности земли и воздуха на уровне 950 hPa за зимний период (90 дней) с декабря 2022 года по февраль 2023 года (рис. 1, 2).

Сравнение рядов температуры поверхности по данным ERA5 и GFS показало высокую согласованность: коэффициент корреляции составил 0,95, средняя разность – около $-0,5$ °C, средняя абсолютная ошибка – $2,0$ °C. Наибольшие расхождения (до 10 °C) приурочены к периодам экстремальных похолоданий (18-22 января 2023 г.), когда ERA5 фиксирует более низкие значения

температуры, чем GFS. Максимальные отклонения наблюдаются в утренние часы, что важно учитывать при анализе ночных температурных инверсий и связанных с ними эпизодов загрязнения воздуха.

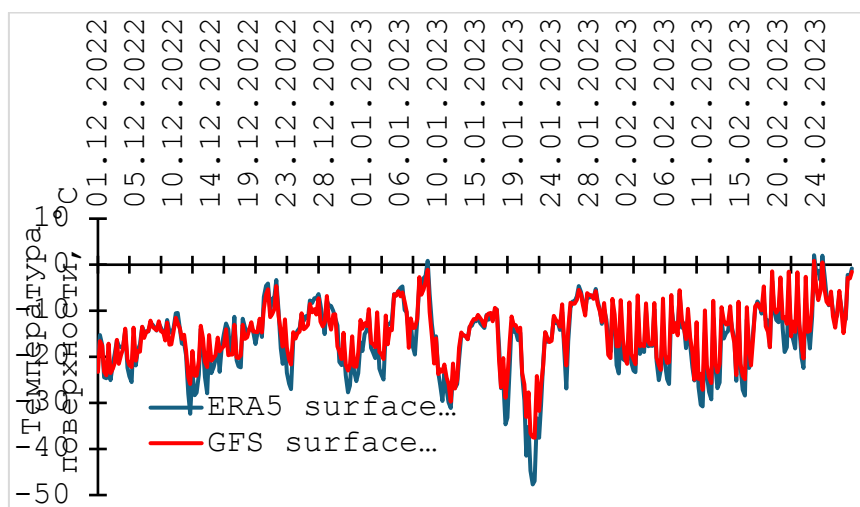


Рис. 1 – Сравнение температуры поверхности по данным ERA5 и GFS.

Сравнение рядов температуры воздуха на уровне 950 гПа по данным ERA5 и GFS показало исключительно высокую согласованность: коэффициент корреляции составил 0,99, средняя разность – около -0,1 °C, средняя абсолютная ошибка – 0,8 °C. Наибольшие расхождения (до 4 °C) приурочены к периодам резких похолоданий (18–22 января, 2 и 13 февраля 2023 г.). В отличие от температуры поверхности, для уровня 950 гПа суточный ход разностей выражен слабо, что делает данные ERA5 и GFS практически взаимозаменяемыми.

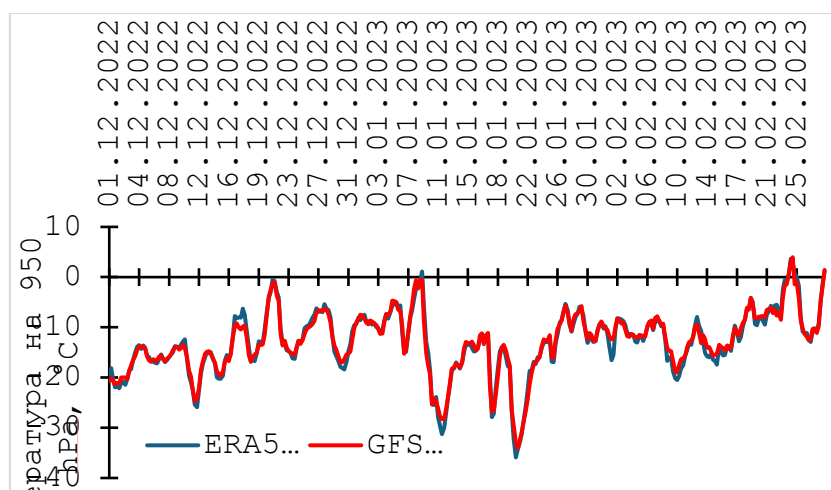


Рис. 2. Сравнение температуры воздуха на вертикальном уровне 950 hPa по данным ERA5 и GFS

Сравнение рядов температуры воздуха на уровне 950 гПа по данным ERA5 и GFS показало исключительно высокую согласованность: коэффициент корреляции составил 0,99, средняя разность – около $-0,1$ °C, средняя абсолютная ошибка – $0,8$ °C. Наибольшие расхождения (до 4 °C) приурочены к периодам резких похолоданий (18–22 января, 2 и 13 февраля 2023 г.). В отличие от температуры поверхности, для уровня 950 гПа суточный ход разностей выражен слабо, что делает данные ERA5 и GFS практически взаимозаменяемыми.

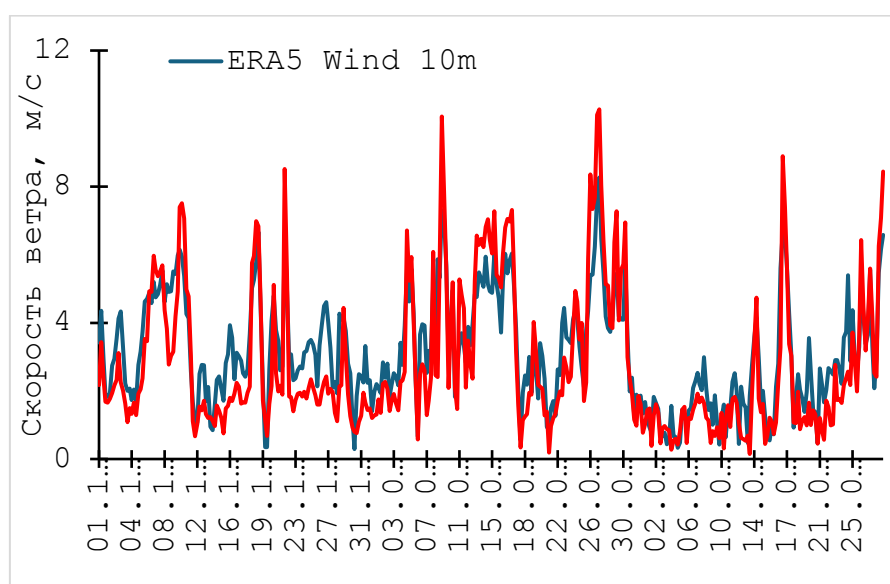


Рис. 3. Сравнение скорости ветра в Красноярске по данным ERA5 и GFS

Сравнение рядов скорости приземного ветра (10 м) по данным ERA5 и GFS показало высокий уровень согласованности: коэффициент корреляции составил 0,89, средняя разность – около $-0,02$ м/с, средняя абсолютная ошибка – $0,7$ м/с. Систематического смещения не выявлено, однако GFS характеризуется большим разбросом значений (максимумы до $10,3$ м/с против $8,3$ м/с у ERA5). Наибольшие расхождения (до 4 м/с) приурочены к периодам усиления ветра (9 января, 26-27 января, 17 февраля 2023 г.), когда GFS систематически показывает более высокие скорости. Максимальные отклонения наблюдаются также в утренние часы.

Проанализирована информация о направлении ветра по данным ERA5 и GFS (таблица)

Таблица.

Роза ветров по восьми румбам для данных ERA5 и GFS

Сектор	ERA5, %	GFS, %
С (0–45°)	8	9
СВ (45–90°)	6	7
В (90–135°)	5	5
ЮВ (135–180°)	7	8
Ю (180–225°)	18	17
ЮЗ (225–270°)	32	30
З (270–315°)	15	14
СЗ (315–360°)	9	10

Средние направления ветра по обоим рядам данных близки: оба источника указывают на юго-западный перенос ($\approx 220\text{--}223^\circ$), что типично для зимнего периода в Красноярске. Корреляция составила 0,89, средняя разность – около -3° , средняя абсолютная ошибка – 25° . Максимальные отклонения наблюдаются в утренние часы. Однако разброс у GFS немного выше: круговое стандартное отклонение $\approx 70^\circ$ против 65° у ERA5. Это означает, что GFS чаще даёт направления, отклоняющиеся от преобладающего ЮЗ-потока.

Таким образом, создан локальный архив метеоданных реанализа ERA5 для города Красноярска и прилегающих районов ($47\text{--}63^\circ$ с. ш., $80,5\text{--}113^\circ$ в. д.), включающий три набора: ERA5 single levels, ERA5 pressure levels (12 уровней от 1000 до 700 мбар) и ERA5-Land. Загрузка выполнена с месячной (ERA5-Land — посуточной) агрегацией, с разделением параметров по категориям и типам временной привязки.

Верификация архива проведена сравнением с независимым источником – моделью NCEP GFS за зимний период 2022/2023 гг. Систематических смещений не выявлено; наибольшие расхождения выявлены для утренних часов и периодов экстремальных похолоданий и усиления ветра. Архив пригоден для: анализа температурных инверсий и периодов повышенного загрязнения воздуха; агроклиматических расчётов и моделирования продуктивности

сельскохозяйственных культур; совместного использования с данными ДЗЗ, подспутниковыми и наземными измерениями.

Для анализа инверсий и загрязнения воздуха ERA5 и GFS могут использоваться совместно, однако при интерпретации экстремальных ситуаций (сильные морозы, сильный ветер) следует учитывать, что ERA5 даёт более сглаженные значения, а GFS — более контрастные.

Список литературы

1. Дергунов А. В., Краснощеков К. В., Якубайлик О. Э. Технологии обработки данных спутникового мониторинга и реанализа для оценки состояния атмосферы воздуха Красноярской агломерации // Вычислительные технологии. – 2022. – Т. 27. – №. 3. – С. 84-94.
2. Er-Rondi M. et al. Evaluation of five reanalysis products over France: Implications for agro-climatic studies // Applied Sciences. – 2024. – Т. 14. – №. 3. – С. 1204.
3. Hersbach H. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – Vol. 146, № 730. – P. 1999–2049. – DOI: 10.1002/qj.3803.
4. National Centers for Environmental Prediction / National Weather Service / NOAA / U.S. Department of Commerce. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. – 2015. – URL: [ucar.edu](https://climate.geog.udel.edu/climate/html/GFS) (дата обращения: 09.02.2026). – DOI: 10.5065/D65D8PWK.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУДОСТРОЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

М.Г. Доррер¹, Д.С. Руденко²

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф.

Решетнева, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, д.82, mdorrer@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается разработка дискретно-событийной имитационной модели процесса судостроения на примере ООО «СК Транзит-СВ». Модель предназначена для прогнозирования загрузки стапелей, бригад и оборудования, а также для оценки длительности строительства судов в условиях серийного производства. Реализация выполнена на языке Python с использованием библиотеки SimPy. Приведены результаты имитационных экспериментов для восьми судов, построена диаграмма Ганта и оценена загрузка критических ресурсов. Модель может служить основой для цифрового двойника бизнес-процесса судостроения и использоваться для оптимизации производственного планирования.

Введение

ООО «СК Транзит-СВ» является одним из ключевых игроков на рынке речных перевозок в Енисейском бассейне, обеспечивая доставку грузов в районы Крайнего Севера, включая стратегически важные объекты нефтегазового комплекса. За более чем 30-летнюю историю компания накопила значительный опыт, развила инфраструктуру (собственный терминал, флот, судостроительные мощности) и заработала репутацию надежного перевозчика. Предприятие располагает флотом из более чем 50 единиц (буксиры, баржи, плавкраны, танкеры), собственным грузовым терминалом в г. Красноярске, а также производственными мощностями для строительства и ремонта судов, включающими стапель на три сборочные позиции, док, цеха механообработки и сварки.

Однако в последние годы, в условиях роста конкуренции, увеличения стоимости ресурсов и необходимости обновления флота, перед предприятием остро встали вопросы повышения операционной эффективности. В ходе предварительного обследования, включавшего серию мозговых штурмов с участием руководителей и ключевых специалистов, был выявлен ряд системных проблем, непосредственно связанных с производственным планированием и управлением судостроительными мощностями.

В судостроении нормирование труда вызывает споры: принятые нормативы (рассчитанные сторонним нормировщиком) не совпадают с фактическими затратами, что демотивирует рабочих при повременной оплате. Выявлены непроизводительные действия: погрузка, перемещение материалов, обслуживание оборудования выполняются основным производственным персоналом, что снижает время непосредственной работы. Ограниченность мощностей проявляется в недостатке окрасочных камер (зависимость от погоды) и конфликте интересов между судостроением и судоремонтом за использование стапеля и кранов. Дефицит квалифицированных кадров (сварщиков, сборщиков корпусов) усугубляется слабой системой наставничества и незаинтересованностью руководителей в удержании молодых специалистов. Проблемы с поставкой материалов (несвоевременность, пересортица) дополнительно срывают графики строительства.

В судоремонте, который использует те же производственные мощности, что и судостроение, главная цель — подготовка флота к навигации к 1 мая. Реальный период ремонта ограничен (февраль-апрель), объёмы работ велики. Основные причины срывов сроков: несвоевременная поставка запчастей, отсутствие технической документации на сложные ремонты, дефицит доковых мест и специализированных участков. Планирование ремонтов ведётся на основе прошлого опыта, но отсутствует система план-факт анализа в разрезе каждого судна. Нет нормативной базы трудоёмкости. Поставки запчастей (особенно для судовых дизелей) требуют длительного поиска, иногда до двух лет. Кадровый дефицит: нехватка квалифицированных механиков, электромехаников.

В управлении производством в целом отсутствует производственно-

технический отдел (ПТО), который бы занимался нормированием, планированием, контролем исполнения и анализом отклонений. Решения принимаются «по опыту», что не позволяет объективно оценивать ситуацию и планировать ресурсы. Нет системы KPI для руководителей, увязывающей оплату с результатами. Это приводит к необоснованным сверхурочным, низкой производительности и срывам сроков строительства и ремонта.

Особенно остро стоит проблема конфликта интересов между судостроением и судоремонтом за использование стапеля, дока и кранов. В пиковые периоды (ремонтная кампания, строительство новых барж) мощности перегружены, что приводит к простоям и задержкам. Отсутствие формализованных нормативов трудоёмкости и грузовых операций не позволяет объективно оценивать потребности в ресурсах и планировать загрузку.

Таким образом, ключевые проблемы, которые могут быть исследованы и решены с помощью имитационного моделирования, включают:

- Необоснованные нормативы трудоёмкости, приводящие к нереалистичным планам и демотивации персонала.
- Отсутствие системы план-факт анализа по каждому судну, что не позволяет выявлять причины срывов и корректировать планы.
- Конфликт интересов между судостроением и судоремонтом за использование критических ресурсов (стапель, док, краны).
- Ограниченность мощностей (недостаток окрасочных камер, дефицит стапельных мест), создающая узкие места в производственном процессе.
- Срывы сроков строительства и ремонта из-за несвоевременной поставки материалов и запчастей.
- Недостаток квалифицированных кадров и слабая система наставничества, влияющие на производительность.

Эти проблемы являются типичными для многих судостроительных и судоремонтных предприятий, и их решение требует системного подхода, основанного на количественном анализе. Традиционные методы планирования, основанные на линейных графиках и экспертных оценках, не позволяют

адекватно учесть стохастический характер длительностей операций, приоритеты ресурсов и взаимодействие между параллельными заказами. Поэтому необходима разработка имитационной модели, которая могла бы воспроизводить реальный процесс строительства судов с учётом всех этих факторов.

Цель данной работы – разработка дискретно-событийной имитационной модели процесса судостроения, позволяющей оценивать загрузку стапелей, бригад и оборудования, прогнозировать время цикла строительства судов, выявлять узкие места и тестировать различные сценарии управления производством. Модель должна стать основой для цифрового двойника бизнес-процесса судостроения и использоваться для оптимизации производственного планирования на предприятии.

Постановка задачи

На основе выявленных проблем разрабатывается дискретно-событийная имитационная модель процесса судостроения, которая должна стать основой для цифрового двойника бизнес-процесса. Модель призвана решить следующие задачи:

- Воспроизведение технологического процесса постройки барж с детализацией до уровня секций, блоков и судна в целом. Модель должна учитывать все основные операции: раскрой металла, сборку секций, сварку, зачистку, окраску, сборку блоков на стапеле, стыковку блоков, финальные работы (сварка корпуса, зачистка, окраска, испытания, спуск). Последовательность операций определяется технологической картой и структурой судна (судно → блоки → секции).
- Моделирование ограниченных производственных ресурсов с приоритетами. Ресурсы включают: плазменные столы (2 ед.), сборочные посты (3 ед.), сварочные посты (4 ед.), окрасочную камеру (1 ед.), стапель №1 (1 ед.) для блоковых операций, стапель №2 (1 ед.) для финальных операций, а также бригады различной специализации (сборщики, сварщики, зачистчики, маляры, такелажники) с заданной

численностью. Все ресурсы моделируются как разделяемые с приоритетным доступом, что позволяет отражать реальную конкуренцию за них между операциями разных заказов. Приоритеты назначаются в соответствии с производственной логикой: финальные операции имеют наивысший приоритет (0), блоковые операции – средний (1), секционные – низший (равный приоритету заказа, чтобы обеспечить справедливость между заказами). Разделение ступеней по назначению исключает взаимные блокировки и позволяет параллельно выполнять сборку блоков и финальные работы.

- Расчёт длительности операций на основе нормативной трудоёмкости и производительности бригад (формулы расчета приведены в пункте «Методы»)
- Прогнозирование ключевых показателей для каждого заказа и для всей производственной программы в целом:
 - длительность строительства каждого судна (время от запуска до сдачи);
 - загрузка каждого ресурса (ступеней, бригад, постов, камер);
 - выявление узких мест (ресурсов с максимальной загрузкой и длительным ожиданием);
 - полная стоимость строительства (материалы, труд, амортизация, накладные расходы);
 - сводные показатели по серии заказов (средняя длительность, общая загрузка, затраты).
- Поддержка сценарного анализа для принятия управленческих решений. Модель должна позволять варьировать следующие параметры для выполнения What-If-анализа:
 - нормативы трудоёмкости (для оценки влияния пересмотра норм);
 - численность и производительность бригад (для оценки эффекта от найма или обучения);
 - количество и доступность ресурсов (например, добавление второго ступени или увеличение числа окрасочных камер);

- интервалы запуска новых заказов (для оценки влияния на загрузку и длительность);
- приоритеты операций (например, смещение приоритета в пользу ремонта в пиковый сезон);
- внешние задержки (поставки материалов, погодные условия) в виде стохастических событий.
- Интеграция с учётными системами предприятия для автоматической калибровки и актуализации. Модель должна использовать фактические данные из 1С (нормативы, планы, фактические трудозатраты, остатки материалов) и системы BPMS (статусы заказов, назначение исполнителей). Это обеспечит возможность периодической перекалибровки параметров модели и повысит точность прогнозов. В перспективе модель должна получать данные о фактических длительностях операций из систем компьютерного зрения (CV) для автоматического уточнения распределений времени.
- Визуализация результатов в понятном для руководителей и плановиков виде: диаграммы Ганта, графики загрузки ресурсов, таблицы с ключевыми показателями, отчёты по узким местам. Это обеспечит быструю интерпретацию результатов и поддержку принятия решений.
- Основные требования к модели:
- Масштабируемость – возможность моделирования произвольного числа заказов (от 1 до 20 и более) с различными стартовыми интервалами.
- Гибкость – возможность изменения структуры судна, состава операций, нормативов и ресурсов без перепрограммирования.
- Стохастичность – учёт вариабельности длительностей операций через задание распределений (в текущей версии – детерминированные нормативы, в перспективе – вероятностные).
- Верифицируемость – возможность сравнения выходных данных модели с историческими данными для подтверждения адекватности.

- Интеграция – наличие API или механизмов обмена данными с внешними системами (1C, ELMA).

Таким образом, разрабатываемая модель призвана стать не просто вычислительным инструментом, а полноценным элементом системы управления производством, позволяющим принимать обоснованные решения на основе объективного прогноза и анализа «что, если». Она позволит руководству предприятия ответить на ключевые вопросы: как изменится длительность строительства при добавлении второго стапеля? какой эффект даст пересмотр нормативов? как сгладить пиковые нагрузки? какая очередность заказов минимизирует простои? Модель также станет основой для цифрового двойника бизнес-процесса судостроения, который в дальнейшем будет интегрирован в иерархическую систему цифровых двойников предприятия, охватывающую логистику, склад и ремонт.

Методы и модель

Для моделирования использован аппарат дискретно-событийного моделирования (DES) на платформе Python с библиотекой SimPy [1]. Технология DES позволяет описывать процессы как последовательность событий, занимающих ресурсы и потребляющих время, что адекватно отражает динамику судостроительного производства [2]. Применение DES в судостроении позволяет получать точные данные для принятия обоснованных решений без необходимости проведения физических тестов [3].

Структура судна и операции. Судно состоит из блоков, каждый блок – из секций. Для каждой секции выполняются операции:

- Раскрой (CUT) – детерминированная длительность, пропорциональная весу секции.
- Сборка секции (ASSY_SEC).
- Сварка секции (WELD_SEC).
- Зачистка секции (CLEAN_SEC).
- Окраска секции (PAINT_SEC) – опционально.

После завершения всех секций блока выполняются блоковые операции на

стапеле №1: сборка блока, сварка, зачистка. После сборки всех блоков – финальные операции на стапеле №2: стыковка блоков, сварка корпуса, зачистка, окраска, испытания, спуск.

Расчёт длительности. Для нормативных операций длительность в днях вычисляется по формуле:

$$D = \frac{H \cdot k}{N \cdot p \cdot t_{\text{день}}}$$

где:

- H – нормативная трудоёмкость (чел.-ч);
- k – доля норматива на операцию;
- N – численность бригады (чел.);
- p – производительность бригады (коэффициент);
- $t_{\text{день}}$ – продолжительность рабочего дня (8 ч).

Для операции раскроя длительность берётся как $D_{\text{CUT}} = 0.02 \cdot w$ (дней), где w – вес секции в тоннах.

Ресурсы и приоритеты. Используются ресурсы:

- плазменные столы (2);
- сборочные посты (3);
- сварочные посты (4);
- окрасочная камера (1);
- стапель №1 (1)
- для блоковых операций;
- стапель №2 (1) – для финальных операций; -
- бригады: сборщики (4), сварщики (6), зачистчики (3), маляры (2), такелажники (2).

Приоритеты запросов: - финальные операции

- 0 (наивысший);
- блоковые – 1;
- секционные
- приоритет заказа (1–8).

Разделение стапелей исключает взаимные блокировки и позволяет

параллельно выполнять сборку блоков и финальные работы.

Реализация на Python. Модель реализована на языке Python с использованием библиотеки SimPy (Discrete-Event Simulation for Python) [1], которая предоставляет мощный и интуитивно понятный аппарат для построения дискретно-событийных имитационных моделей. SimPy позволяет описывать активные компоненты системы (процессы) как генераторы Python, взаимодействующие через разделяемые ресурсы с приоритетами и очередями. В основе модели лежит событийно-ориентированная архитектура, где каждый процесс (например, выполнение операции судостроения) представляет собой последовательность событий: ожидание ресурсов, выполнение работы, освобождение ресурсов и передача управления следующему этапу.

Для управления ресурсами используется класс `simpy.PriorityResource`, который обеспечивает доступ к ограниченному числу единиц ресурса с учётом приоритета запроса. Это позволяет моделировать реальную производственную логику, где финальные операции (стыковка блоков, испытания, спуск) имеют наивысший приоритет и не могут быть задержаны менее приоритетными задачами. Синхронизация между операциями одного заказа реализована через механизм событий `simpy.Event` и конструкцию `simpy.AllOf`, которая позволяет процессу ожидать завершения всех предшествующих операций перед началом следующей. Для хранения структуры судна и параметров операций используются классы `dataclass`, обеспечивающие удобную и читаемую организацию данных.

Обработка конфигурации модели (нормативы трудоёмкости, состав бригад, структура судна, ресурсные ограничения) выполняется с использованием встроенных структур данных Python (словари, списки) и библиотеки `json` для сериализации. Генерация графа операций с учётом топологической сортировки реализована на основе алгоритма Кана, что гарантирует корректный порядок выполнения даже при наличии сложных зависимостей между операциями.

В коде модели также используются стандартные библиотеки `random` и `numpy` для генерации случайных величин (в текущей версии – детерминированных, в перспективе – для стохастических распределений), а также `collections.defaultdict` для агрегации статистических данных по загрузке ресурсов

и затратам. Визуализация результатов (диаграммы Ганта, графики загрузки) выполняется с помощью библиотек `matplotlib` и `seaborn`, а формирование итоговых таблиц – с использованием `pandas`.

Ниже приведён ключевой фрагмент кода, реализующий запрос ресурсов с приоритетом и ожидание предшественников.

Листинг 1. Ключевой фрагмент процесса – запрос ресурсов с приоритетом и ожидание предшественников:

```
# Запрос стапеля
if wo.slipway_required:
    if wo.only_slipway2:
        req = slipway2.request(priority=wo.priority)
    else:
        req = slipway1.request(priority=wo.priority)
    requests.append(req)

# Запрос остальных ресурсов
for res_name, amount in wo.required_resources:
    res = resource_manager.resources[res_name]
    for _ in range(amount):
        req = res.request(priority=wo.priority)
        requests.append(req)

yield simpy.AllOf(env, requests) # ожидание всех ресурсов
yield env.timeout(wo.duration)  # выполнение операции
```

Результаты

Проведена симуляция строительства 8 барж (заказы Order_1 ... Order_8) с интервалом запуска 182,5 дня. Длительность моделирования – 1460 дней. Результаты по длительности и стоимости сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Результаты имитационных экспериментов

Заказ	Длительность, дни	Полная стоимость, тыс. руб.
Order_1	338.99	91726.40
Order_2	396.47	92588.71
Order_3	413.55	92844.86
Order_4	397.42	92602.85
Order_5	413.55	92844.86
Order_6	397.42	92602.85
Order_7 (не завершён)	—	—
Order_8 (не завершён)	—	—

Диаграмма Ганта по этапам (рис. 1) показывает последовательное выполнение секционных, блоковых и финальных работ, а также позволяет визуально оценить перекрытие заказов и загрузку стапелей.

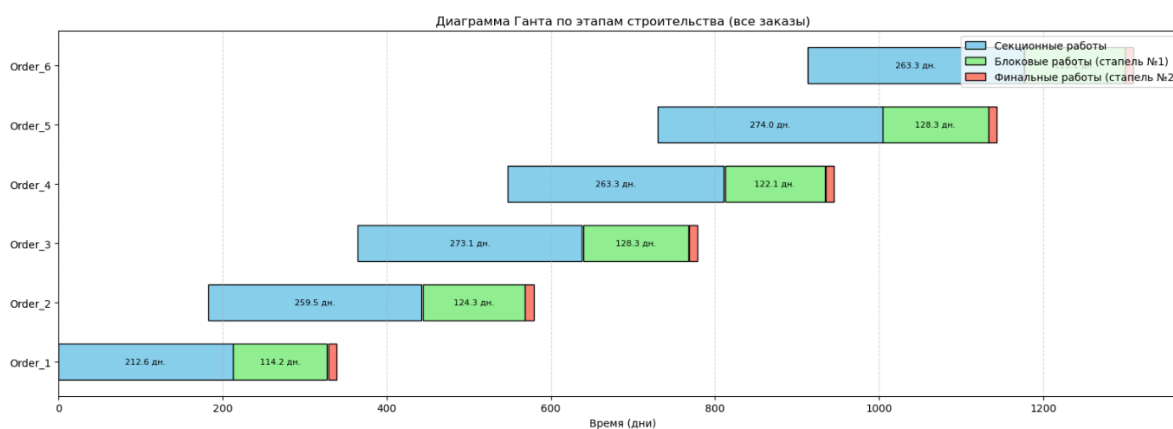


Рис. 1. Диаграмма Ганта по этапам строительства (прогнозная).

Загрузка стапеля №1 (блоковые операции) достигает 100% в пиковые периоды, а стапель №2 (финальные) используется эпизодически, что указывает на дисбаланс мощностей. Средняя длительность строительства одной баржи составила около 390 дней, что превышает плановые нормативы, что свидетельствует о необходимости пересмотра ресурсного обеспечения.

В ходе имитационных экспериментов для восьми барж с интервалом запуска 182,5 дня были получены следующие результаты: средняя длительность строительства составила около 390 дней, что превышает плановые 350 дней, а загрузка стапеля №1 в пиковые периоды достигала 100%, что указывает на наличие узкого места. Анализ загрузки ресурсов показал, что стапель №1 является критическим ресурсом, тогда как стапель №2 (финальные операции) используется эпизодически, что свидетельствует о дисбалансе мощностей. Сценарный анализ с добавлением второго стапеля для блоковых операций показал возможность сокращения средней длительности до 355 дней, что подтверждает потенциал модели для обоснования инвестиционных решений.

Верификация модели на исторических данных одного завершённого судна показала отклонение менее 5 %, что подтверждает адекватность параметризации (нормативные трудоёмкости, численность бригад, производительность). Это позволяет использовать модель для прогнозного анализа «что, если» и поддержки принятия решений при планировании новых заказов, корректировке нормативов и распределении ресурсов. Модель также позволяет оценивать полную стоимость строительства, включая материальные затраты, фонд оплаты труда, амортизацию и накладные расходы, что даёт возможность руководству принимать экономически обоснованные решения.

Вывод

В ходе выполнения работы разработана дискретно-событийная имитационная модель процесса судостроения, предназначенная для прогнозирования загрузки стапелей, бригад и оборудования, а также для оценки длительности строительства судов в условиях серийного производства. Модель реализована на языке Python с использованием библиотеки SimPy, что

обеспечивает её гибкость, масштабируемость и возможность интеграции с внешними системами. Структура модели отражает иерархию судна (судно → блоки → секции) и технологическую последовательность операций (раскрой, сборка секций, сварка, зачистка, окраска, сборка блоков, финальные работы), что позволяет детально воспроизводить реальный производственный процесс.

Разработанная модель представляет собой не изолированный инструмент, а первый шаг к созданию **иерархического цифрового двойника бизнес-процессов** предприятия (см. рис. 2) [4], который в перспективе охватит все ключевые направления деятельности: судостроение, судоремонт, терминальную обработку грузов, складское хозяйство и глобальную логистику. В рамках этой иерархической архитектуры модель судостроения занимает уровень детальных процессов (Level 1) и взаимодействует с моделями ремонта, терминала и склада, а также с глобальной логистической моделью (Level 0), которая задаёт планы запуска новых заказов, поставки материалов и доступность мощностей. Обмен данными осуществляется через интеграционный уровень (Level 2), включающий системы BPMS (ELMA), учётную систему 1С, инструменты компьютерного зрения (CV) для автоматического хронометража и модели на основе больших языковых моделей (LLM) для извлечения событий из текстовых документов и переписки.

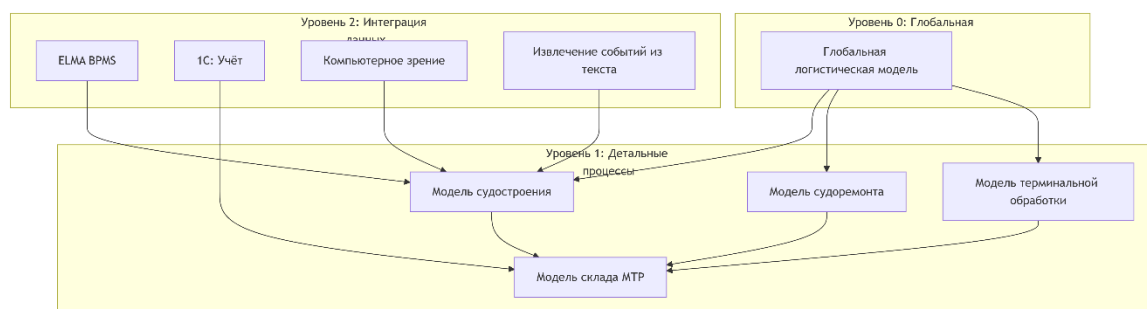


Рис. 2 – Перспективная архитектура цифрового двойника

Такая архитектура позволяет:

- **Синхронизировать** производственные планы судостроения с ремонтными кампаниями и логистическими графиками,

минимизируя конфликты за использование стапеля, дока и кранов.

- **Автоматически калибровать модель** на основе фактических данных из 1С (трудозатраты, остатки материалов) и CV-систем (фактические длительности операций), что повышает точность прогнозов и снижает трудоёмкость ручной настройки.
- **Оценивать эффект от управленческих решений** на всех уровнях: от изменения нормативов на отдельной операции до переноса сроков запуска целой серии судов с учётом загрузки всего производственного комплекса.
- **Формировать единое информационное пространство** для плановиков, руководителей и владельцев процессов, обеспечивая прозрачность и объективность при принятии решений.

Для предприятия ООО «СК Транзит-СВ» внедрение такого цифрового двойника означает:

- **Создание производственно-технического отдела (ПТО)** с современным инструментарием для нормирования, планирования и контроля.
- **Переход от «опытного» планирования к прогнозному**, основанному на объективных данных и сценарном анализе.
- **Снижение простоев и задержек** за счёт выявления узких мест и заблаговременной корректировки планов.
- **Обоснование инвестиций в расширение мощностей** (второй стапель, дополнительная окрасочная камера) на основе количественных оценок эффекта.
- **Повышение прозрачности** для руководства и акционеров через визуализацию загрузки и прогнозов.

В дальнейшем развитие модели предполагает:

1. **Внедрение стохастических распределений** для длительностей операций на основе данных Process Mining, что позволит учитывать вариабельность и повысить реалистичность прогнозов.
2. **Интеграцию с системой компьютерного зрения** для автоматического

сбора фактических временных параметров операций и их использования для перекалибровки модели без участия человека.

3. **Расширение модели на судоремонт и терминальную обработку**, чтобы обеспечить сквозное моделирование всех процессов предприятия в рамках единого цифрового двойника.
4. **Разработку пользовательского интерфейса** для плановиков и руководителей, позволяющего запускать сценарии, визуализировать результаты и формировать отчёты без программирования.
5. **Интеграцию с системами BPMS (ELMA)** для автоматического получения текущих статусов заказов, назначений исполнителей и фактических трудозатрат, что обеспечит непрерывную актуализацию модели в реальном времени.

Таким образом, разработанная имитационная модель судостроения является не только самостоятельным инструментом анализа, но и ключевым элементом будущей системы управления производством, основанной на принципах цифрового двойника. Её внедрение позволит предприятию перейти на качественно новый уровень планирования, повысить операционную эффективность и конкурентоспособность в условиях динамичного рынка речных перевозок.

Благодарности.

Работа выполнена при поддержке ООО «СК Транзит-СВ» в рамках программы повышения операционной эффективности предприятия.

Список литературы

1. Man, and Cybernetics. — 1992. — Vol. 22, no. 1. — P. 177–182. — DOI: 10.1109/21.141323
2. Matloff N. Introduction to Discrete-Event Simulation and the SimPy Language. – Davis, CA: University of California, Dept. of Computer Science, 2008.
3. Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., Nicol D.M. Discrete-Event System Simulation. – 5th ed. – Upper Saddle River: Pearson Education, 2010.

4. Соколов С.С. Применение имитационного моделирования в процессах постройки судна // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2024. – № 3 (39). – С. 44–51.
5. Doppep M.G. Implementation of the digital twin of educational business processes on the ELMA BPMS platform // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2647. – P. 040088. DOI: 10.1063/5.0104472.
6. van der Aalst W.M.P. Process Mining: Data Science in Action. – 2nd ed. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2016.
7. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2015.
8. Framework for the Development of a Process Digital Twin in Shipbuilding: A Case Study in a Robotized Minor Pre-Assembly Workstation // MDPI. – 2026. – URL: <https://www.mdpi.com> (дата обращения: 22.06.2026).
9. Bordbar A., Tadros M., Nazemian A., Aung M.Z., Georgoulas K., Louvros P., Boulougouris E. Digitalisation of shipyard production planning: a review of simulation, optimisation, AI, and digital twin methods (2010–2025) // Journal of Marine Science and Engineering. – 2026. – Vol. 14, No. 4. – 396. DOI: 10.3390/jmse14040396.
10. Елиферов В.Г., Репин В.В. Бизнес-процессы: регламентация и управление. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 320 с.
11. Кулик Ю.Г., Сумеркин Ю.В. Технология судостроения и судоремонта. – Л.: Судостроение, 1988. – 384.

МУЛЬТИМАСШТАБНАЯ ТОПООСНОВА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АТМОСФЕРЫ КРАСНОЯРСКА

М.Г.Ерунова¹, А.К.Матузко², А.С.Кузнецова³

¹Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
СО РАН», *marina@icm.krasn.ru*

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, *akmatuzko@icm.krasn.ru*

³Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО
РАН», *anna.simakina.97@mail.ru*

Красноярск — один из крупнейших промышленных центров Сибири, расположенный в долине реки Енисей. Сочетание выраженной расчленённости рельефа, перепадов абсолютных высот между правым и левым берегами реки, плотной многоэтажной застройки и значительного количества точечных источников эмиссии определяет сложную динамику приземного слоя атмосферы и выраженную пространственную неоднородность полей метеорологических величин и концентраций примесей. Эффективным инструментом комплексного анализа подобных процессов является цифровой двойник атмосферы города — совокупность математических моделей и взаимосвязанных геопространственных данных, обеспечивающая оперативную оценку городского теплового баланса, качества воздуха и микроклиматических условий.

Концепция цифрового двойника в последние годы получила активное развитие применительно к природно-техническим и урбанизированным системам. В международной практике сформировались методологические подходы к построению цифровых двойников городов, ориентированные на управление транспортными потоками, энергопотреблением, городским микроклиматом и качеством воздуха [1-3] и подтверждающие необходимость согласованной мультимасштабной топоосновы.

Информационной основой цифрового двойника служит мультимасштабная топооснова — согласованный набор данных о границах моделирования, рельефе, подстилающей поверхности и температурных полях, от достоверности которого напрямую зависят результаты моделирования переноса примесей и теплового режима городской среды. Для городского округа город Красноярск такая

топооснова объединяет данные дистанционного зондирования Земли, наземных измерений и геоинформационных технологий. Актуализация границ округа и построение вложенных расчётных доменов задают пространственный каркас; цифровые модели рельефа (ЦМР) на основе данных FABDEM отражают сложную орографию долины Енисея, определяющую условия рассеивания примесей; картографирование зелёных насаждений и построение карты локально-климатических зон (LCZ) характеризуют неоднородность застройки и подстилающей поверхности; расчёт температуры подстилающей поверхности (LST) и оценка городского острова тепла учитывают термическое влияние незамерзающего участка Енисея и плотной застройки. Эти данные используются в численной модели прогноза погоды WRF и гидродинамической модели Красноярского водохранилища и определяют точность атмосферного моделирования и достоверность прогнозов распространения загрязняющих веществ. Все данные приведены к единой картографической проекции Pseudo-Mercator (EPSG:3857) и привязаны к расчётным доменам, что обеспечивает их сквозную согласованность на всех этапах моделирования. Обработка выполнялась в ГИС QGIS и SAGA GIS.

Цифровая граница города является базовым элементом топоосновы, определяющим пространственные границы исследований. В отчётный период в Красноярском крае произошла муниципальная реформа: Законом Красноярского края от 15 мая 2025 года № 9-3914 образован городской округ город Красноярск в новых границах [4]. На основе текста закона и официальных картографических материалов оцифрован векторный слой границы городского округа по состоянию на 2025 год. По его контуру построен полигон области моделирования, определяющий границы обрезки всех исходных геопространственных данных и обеспечивающий согласованность слоёв топоосновы. Полигон охватывает городскую территорию в новых границах с буферной зоной, необходимой для корректного моделирования атмосферных процессов на границах расчётной области.

Для обеспечения мультимасштабного моделирования атмосферных процессов построены вложенные расчётные сетки (домены) d01, d02, d03 с

последовательно увеличивающимся пространственным разрешением. Крупномасштабный домен предназначен для воспроизведения макромасштабных процессов, вложенные сетки обеспечивают детальное моделирование городских микроклиматических эффектов.

Территория городского округа характеризуется значительными перепадами высот между берегами Енисея и наличием обширных промышленных и жилых зон, что предъявляет высокие требования к точности ЦМР при моделировании полей ветра и переноса примесей. Применение традиционных глобальных моделей рельефа (ASTER GDEM, SRTM и др.) в городских условиях ограничено вследствие систематических ошибок, обусловленных влиянием застройки и древесной растительности [5]. В связи с этим в качестве исходных данных для построения ЦМР выбрана модель FABDEM, построенная с применением алгоритмов машинного обучения и устраняющая влияние зданий и растительного покрова на высотные отметки [6].

По данным [6], средняя абсолютная вертикальная ошибка модели в лесных массивах снижена с 5,15 м до 2,88 м, а в застроенных районах – с 1,61 м до 1,12 м. Данные FABDEM находятся в открытом доступе; объединение тайлов, покрывающих исследуемую территорию, выполнено в системе QGIS, полученный растр перепроецирован в единую проекцию проекта и ограничен контуром области исследования. При детальном анализе поверхности выявлены артефакты, соответствующие контурам строений. Для повышения морфометрической корректности ЦМР выполнена постобработка в системе SAGA GIS, включавшая удаление высотных характеристик зданий по векторным маскам фундаментов, интерполяцию пропусков, устранение замкнутых локальных понижений, способных исказить трассировку поверхностного стока, сглаживание высокочастотных шумов и пересчёт к целевому пространственному разрешению. Основные этапы подготовки ЦМР представлены на рисунке 1.



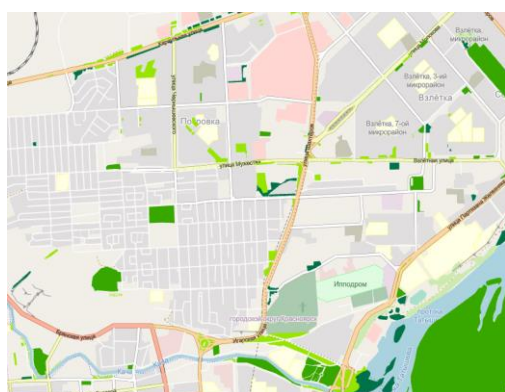
Рис. 1. Основные этапы подготовки мультимасштабных ЦМР в системах QGIS и SAGA GIS.

В результате сформированы мультимасштабные ЦМР с пространственным разрешением 45, 10 и 5 метров, а также соответствующие им слои теневоего рельефа (отмывки рельефа), предназначенные для визуализации рельефа городского округа в веб-среде. Дополнительно для смежной задачи подготовлена ЦМР с разрешением 10 м на территорию, заданную координатами.

Для визуализации распределения загрязняющих веществ не только в плановом измерении, но и по высоте относительно рельефа выполнена оцифровка высотных уровней (горизонталей). Методика включала построение бинарных растров для заданных высотных интервалов, их конвертацию в векторные полигоны, удаление мелких артефактов, сглаживание границ и заполнение атрибутивных таблиц. В диапазоне абсолютных высот от 140 до 800 м с шагом 25 м получено 28 векторных слоёв, экспортированных в JSON-формат для интеграции в программный прототип системы мониторинга приземного слоя атмосферы.

Зелёные насаждения снижают температуру поверхности за счёт затенения и испарения, поглощают загрязняющие вещества и формируют микроклимат городской среды [7]. Для их картографирования на территории городского округа использованы данные OpenStreetMap (парки, леса, газоны, луга, кустарники, рядовые посадки деревьев) [8] и спутниковые сцены Sentinel-2 Level-2A с

минимальной облачностью (менее 20 %) в вегетационный период. Четыре сцены объединены в единое бесшовное мозаичное изображение. По красному и ближнему инфракрасному каналам рассчитан вегетационный индекс NDVI, по пороговым значениям которого выделены участки с различной плотностью растительного покрова: высокоплотной, среднеплотной и низкоплотной растительности. Пространственное пересечение векторизованного растра NDVI с данными OpenStreetMap позволило сформировать векторный слой зелёных насаждений с категориями: леса и лесопарки; редколесье и кустарники; травянистая растительность (рисунок 2).



а)



б)

Рис. 2. Выделение зелёных насаждений на территории Красноярска: а) исходные данные OpenStreetMap; б) интеграция данных OSM и NDVI (Sentinel-2).

Классификация локально-климатических зон (LCZ) позволяет дифференцировать территорию по сочетанию типов застройки и почвенно-растительного покрова в рамках универсальной типологии из 17 стандартных классов [9]. Исходная карта LCZ с разрешением 100 м получена с помощью веб-сервиса LCZ Generator [10]. Для уточнения пространственной привязки и повышения тематической точности классификации выполнена агрегация растровой карты по векторным границам городских кварталов из OpenStreetMap: каждому кварталу присвоен преобладающий класс LCZ по результатам статистического анализа пиксельных значений, что устранило пиксельный шум и адаптировало карту к реальной планировочной структуре города (рисунок 3).

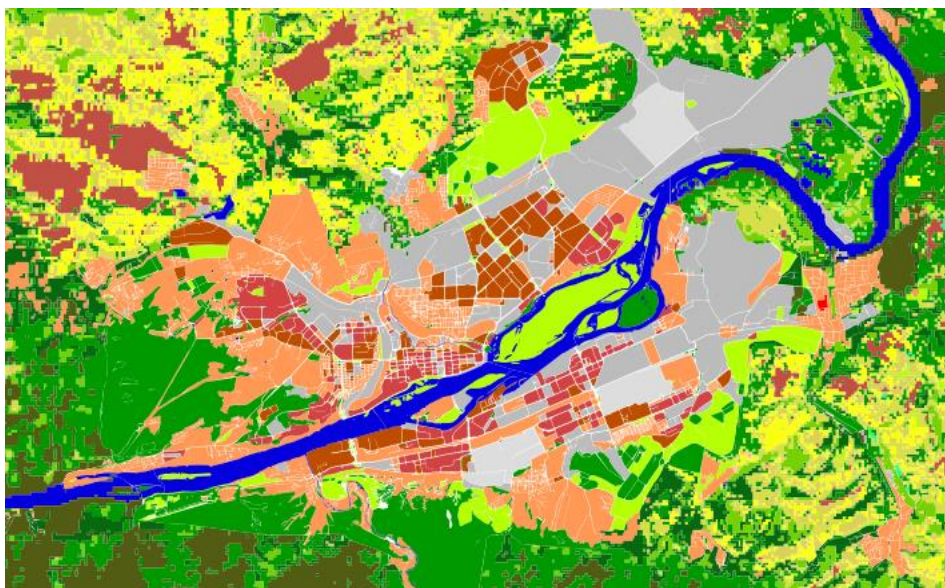


Рис. 3. Поквартальные LCZ на примере городского округа город Красноярск.

Расчёт температуры поверхности (LST) выполнен по данным Landsat 8-9 Collection 2 Level 2. Использование штатного теплового канала ограничено пропусками, связанными с отсутствием данных спектральной излучательной способности в базе ASTER GED для ряда территорий. Разработан алгоритм, полностью восстанавливающий покрытие: определение коэффициента излучения по NDVI; расчёт интенсивности излучения по атмосферным параметрам модели MODTRAN (пропускание, восходящее и нисходящее излучение); вычисление яркостной температуры по формуле (1) и расчёт LST по одноканальному алгоритму [11]:

$$TB = K2 / \ln(K1/L + 1) \quad (1)$$

Построены температурные карты с пространственным разрешением 30 м для дат 21.04.2024, 26.07.2024 и 20.09.2024, переданные для дальнейшего моделирования. Для формирования внутригородского теплового острова из банка спутниковых данных отобраны 63 максимально безоблачные сцены Landsat 8-9 за период 2013–2025 гг. в бесснежный период (38 летних, 12 весенних и 13 осенних; зимние сцены исключены из-за высокого снежного покрова, препятствующего определению температуры). По полученным данным сформированы контуры теплового острова городского округа город Красноярск.

При корректной атмосферной коррекции и отборе безоблачных сцен расхождение спутниковых данных с наземными измерениями минимальны: стандартная ошибка оценки LST, по данным валидационных исследований,

составляет 1–4 °С [12], а внутрисценный разброс на акваториях – 0,1–0,5 °С при пороге чувствительности теплового сенсора около 0,05 °С [13]. Калибровка данных для акватории выполнялась по показаниям гидрологического поста в нижнем бьефе Красноярской ГЭС; среднее расхождение со спутниковыми данными на участке Енисея в границах города не превышает 0,5 °С [14].

Сформированная мультимасштабная топооснова охватывает ключевые компоненты, необходимые для функционирования цифрового двойника атмосферы Красноярска: актуальные границы и вложенные расчётные домены, мультимасштабные ЦМР и высотные уровни рельефа, карты зелёных насаждений и локально-климатических зон, температурные поля и контуры городского теплового острова. Все данные согласованы в единой проекции и привязаны к расчётным сеткам, что обеспечивает их непосредственное использование моделями прогноза погоды WRF и сервисными компонентами системы мониторинга приземного слоя атмосферы.

Дальнейшие работы предусматривают уточнение ЦМР по данным воздушного лазерного сканирования территории города, пополнение базы данных температуры поверхности новыми спутниковыми сценами и интеграцию топоосновы в единую базу геоданных цифрового двойника.

Список литературы

1. Wong N.H., He Y., Nguyen N.S., Raghavan S.V., Martin M., Hii D.J.C., Yu Z., Deng J. An integrated multiscale urban microclimate model for the urban thermal environment // *Urban Climate*. — 2021. — Vol. 35. — P. 100730. — ISSN 2212-0955. — DOI: 10.1016/j.uclim.2020.100730.
2. Leveraging digital twins for urban health and sustainability: A case study for urban air quality management in Manhattan // *Environmental Modelling & Software*. — 2026. — Vol. 178. — P. 106214. — DOI: 10.1016/j.envsoft.2026.106214.
3. Priyadarsini R., Wong N.H., Cheong K.W. Microclimatic modelling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island // *Solar Energy*. — 2008. — Vol. 82, No. 8. — P. 727–745. — DOI: 10.1016/j.solener.2008.02.008.
4. Закон Красноярского края от 15 мая 2025 года № 9-3914 «О территориальной организации местного самоуправления в Красноярском крае» (принят Законодательным Собранием Красноярского края 14 мая 2025 года, подписан Губернатором Красноярского края 15 мая 2025 года, вступил в силу 19 июня

- 2025 года). – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/2400202505220004/> (дата обращения: 20.07.2026).
5. Uuema E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Kmoch A. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, No. 21. – P. 1–23. – DOI 10.3390/rs12213482.
 6. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters*. – 2022. – Vol. 17, No. 2. – P. 024016. – DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
 7. Gill S.E., Handley J.F., Ennos A.R., Pauleit S. Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure // *Built Environment*. – 2007. – Vol. 33, No. 1. – P. 115–133.
 8. OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap Data. – URL: openstreetmap.org (дата обращения: 01.09.2026).
 9. Stewart I.D., Oke T.R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2012. – Vol. 93, No. 12. – P. 1879–1900. – DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
 10. Demuzere M., Kittner J., Bechtel B. LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps // *Frontiers in Environmental Science*. — 2021. — 9: 637455. – DOI: 10.3389/fenvs.2021.637455.
 11. Ghasempour F., Sekertekin A., Kutoglu S.H. How Landsat 9 is superior to Landsat 8: Comparative assessment of land use land cover classification and land surface temperature // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2023. – Vol. X, 4-W1-2022. – P. 221–227.
 12. Li Z.-L. et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives // *Remote Sensing of Environment*. — 2013. — Vol. 131. — P. 14–37.
 13. Malakar N.K., Hulley G.C., Hook S.J. et al. An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 56, iss. 10. – P. 5717–5735. – DOI: 10.1109/TGRS.2018.2824828.
 14. Матузко А.К., Шапарев Н.Я., Якубайлик О.Э. Дистанционное зондирование и аналитическое моделирование температурного режима реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2025. – Т. 22, № 5. – С. 346–356. – DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-346-356.

ПОКВАРТАЛЬНАЯ КАРТА ЛОКАЛЬНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН КРАСНОЯРСКА ДЛЯ МОДЕЛИ WRF

М.Г.Ерунова¹, А.К.Матузко²

¹Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
СО РАН», *marina@icm.krasn.ru*

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, *akmatuzko@icm.krasn.ru*

Локально-климатические зоны (Local Climate Zones, LCZ) представляют собой универсальную классификацию городской и природной подстилающей поверхности по сочетанию типов застройки и почвенно-растительного покрова, разработанную для стандартизации городских температурных и микроклиматических исследований [1]. На основе данной типологии в мире ведутся работы по глобальному картографированию локальных климатических зон: создаются базы данных формы и функций городов [2], глобальные продукты LCZ, предназначенные для поддержки моделирования земной системы и городской среды [3], а также региональные карты, формируемые в рамках международной инициативы WUDAPT [4].

Практика применения LCZ в городском климатическом моделировании подтверждает их эффективность при задании параметров подстилающей поверхности в мезомасштабных моделях прогноза погоды, в том числе в модели WRF [4]. Мезомасштабное моделирование атмосферных процессов для Красноярской агломерации ранее выполнялось и с применением вложенных расчётных доменов [5, 6]; создание детальной поквартальной карты LCZ позволяет задать обоснованные параметры подстилающей поверхности и повысить достоверность таких расчётов. Вместе с тем для городского округа город Красноярск поквартальная карта LCZ до настоящего времени не создавалась.

В рамках построения цифрового двойника атмосферы Красноярска формируется единая база геоданных, интегрирующая разномасштабные геопространственные слои подстилающей поверхности [7]. Поквартальная карта LCZ является ключевым компонентом этой базы, обеспечивающим настройку

модели WRF при расчёте городского теплового баланса и динамики приземного слоя атмосферы.

В статье представлена методика построения поквартальной карты локально-климатических зон городского округа город Красноярск, её верификация по квартальной сетке, уточнение природных классов по данным дистанционного зондирования Земли и подготовка карты к использованию в модели WRF в составе единой базы геоданных цифрового двойника атмосферы города.

Единая база геоданных цифрового двойника атмосферы города интегрирует основные геопространственные слои блока мониторинга и учёта городской специфики – границы территории и расчётные домены, цифровые модели рельефа, зелёные насаждения, температурные поля поверхности и поквартальную карту LCZ – в общей картографической проекции Pseudo-Mercator (EPSG:3857). Обработка слоёв выполнялась средствами геоинформационных систем QGIS и SAGA GIS. Из базы геоданных пространственные данные передаются в вычислительный блок, где используются при подготовке и настройке модели WRF; приведение данных к общей проекции и привязка к вложенным расчётным сеткам обеспечивают их сквозную согласованность на всех этапах моделирования [2].

Для исследования атмосферных процессов городского масштаба в рамках проекта используется численная модель прогноза погоды WRF (Weather Research and Forecasting) – мезомасштабная модель с открытым исходным кодом, разрабатываемая Национальным центром атмосферных исследований США (NCAR), решающая уравнения атмосферной термогидродинамики на вложенных сетках и применяется для воспроизведения полей метеорологических величин, расчёта городского теплового баланса и переноса примесей в приземном слое атмосферы [8]. Достоверность результатов моделирования в значительной степени определяется корректным заданием параметров подстилающей поверхности. Классы LCZ кодируют геометрические и теплофизические характеристики городской среды – высоту и плотность застройки, отношение высоты зданий к ширине улиц, теплофизические свойства материалов, долю

растительности и водных поверхностей. Передача карты LCZ в модель WRF с городской параметризацией [9] позволяет присваивать каждому расчётному пикселю обоснованные значения шероховатости, альбедо, теплоёмкости и тепловой инерции подстилающей поверхности.

Типология LCZ [1] включает 17 стандартных классов: 10 типов застройки и 7 типов почвенно-растительного покрова. Каждый класс характеризуется диапазонами морфометрических параметров – высотой зданий, плотностью застройки, отношением высоты зданий к ширине улиц (H/W), а также теплофизическими свойствами подстилающей поверхности. К типам застройки относятся компактные высотные, среднеэтажные и малоэтажные здания (классы 1–3), открытые высотные и среднеэтажные здания (классы 4–5), открытые малоэтажные здания (класс 6), лёгкие малоэтажные здания (класс 7), крупные малоэтажные здания (класс 8), разрежённая застройка (класс 9) и тяжёлая промышленность (класс 10). Почвенно-растительный покров представлен густыми деревьями (A), разрозненными деревьями (B), кустарниками (C), низкорослой растительностью (D), голыми скалами и мощёными поверхностями (E), голой почвой и песком (F) и водой (G).

В качестве исходной картографической основы использованы данные веб-сервиса LCZ Generator, обеспечивающего построение карт локальных климатических зон с пространственным разрешением 100 м на основе анализа спутниковых снимков и эталонных выборок, размеченных экспертами для каждого класса [10]. Генерация исходных данных выполнена для территории городского округа город Красноярск; на выходе получен растровый файл GeoTIFF (рисунок 1). Для последующего пространственного анализа и интеграции с векторными слоями растр преобразован в векторный формат средствами геоинформационной системы QGIS 3.40.

Для повышения пространственного разрешения и качества классификации выполнена агрегация исходной растровой карты LCZ с разрешением 100 м по векторным границам городских кварталов, полученным из OpenStreetMap [11]. Каждому кварталу присвоен преобладающий класс LCZ по результатам статистического анализа пиксельных значений исходного растра в

пределах его границ, что позволяет устранить пиксельный шум растровых классификаций и адаптировать карту к реальной планировочной структуре города. Поквартальное уточнение выполнено в 126 населённых пунктах в границах исследования, соответствующих городскому округу город Красноярск в новых границах [12]. На рисунке 1 сопоставлены исходная и уточнённая карты локально-климатических зон городского округа город Красноярск: а) исходная классификация LCZ Generator; б) уточнённая поквартальная классификация.

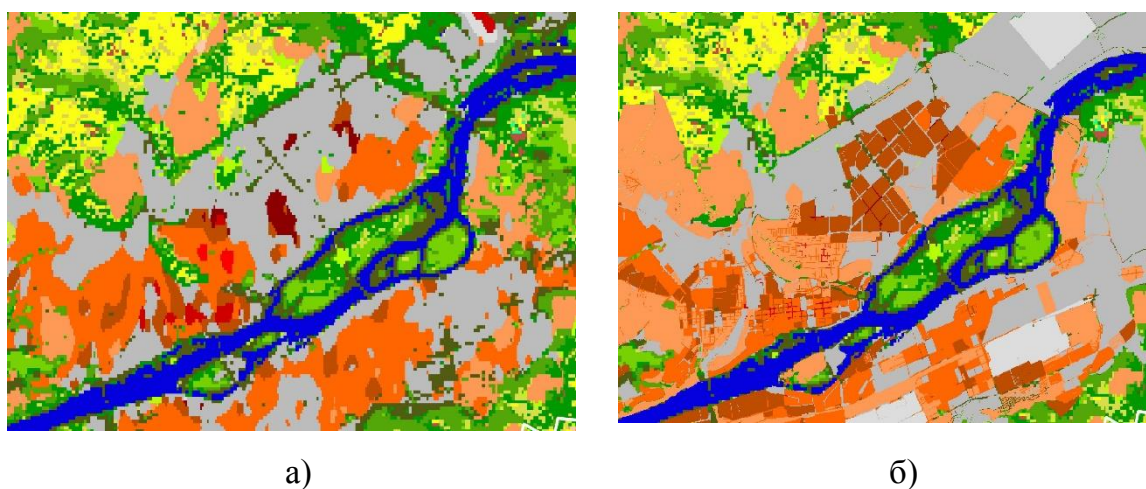


Рис. 1. Фрагменты карты LCZ городского округа город Красноярск: а) исходная классификация (LCZ Generator); б) поквартальная классификация.

В ходе перехода к поквартальной классификации в отдельных кварталах возникали мелкие изолированные фрагменты, не соответствующие преобладающей застройке квартала. Для их устранения выполнена постобработка: лишние фрагменты удалены по порогу площади, границы классов сглажены, пустые ячейки заполнены соседними доминирующими классами. Сравнение квартала до и после обработки приведено на рисунке 2.

Помимо поквартального обобщения, на основе слоя зелёных насаждений выполнена дополнительная корректировка природных классов LCZ (A–D) с использованием актуальных данных о растительном покрове, полученных по вегетационному индексу NDVI снимков Sentinel-2 [13]. Зелёные насаждения оказывают существенное влияние на формирование микроклимата и теплового комфорта городской среды [14], поэтому их достоверный учёт принципиально

важен для корректного картографирования природных классов локально-климатических зон.

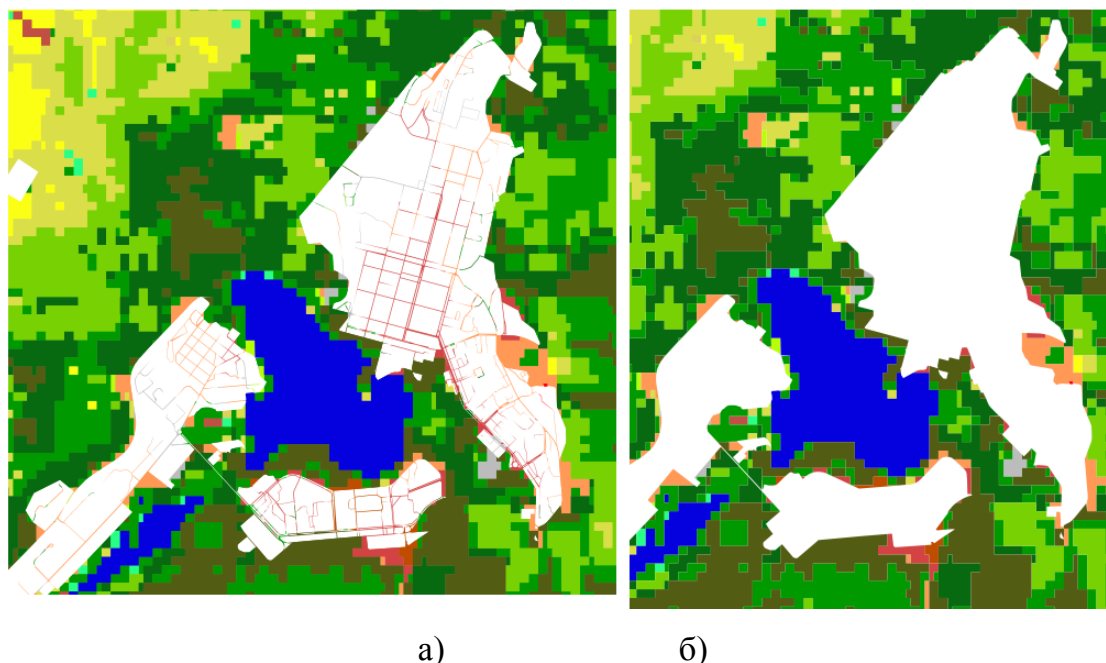


Рис. 2. Удаление шума после перехода к уточнённой классификации LCZ: а) квартал LCZ до обработки; б) квартал LCZ после обработки.

Поквартальное обобщение исходной классификации привело к расширению номенклатуры: помимо 17 базовых типов выделены дополнительные переходные классы, увеличившие общее число категорий до 31. Итоговая уточнённая карта LCZ экспортирована в растровый формат GeoTIFF с пространственным разрешением 100 м и зарегистрирована в единой базе геоданных цифрового двойника. Общий вид карты LCZ с выделенными расчётными доменами (01 domain, 02 domain, 03 domain) представлен на рисунке 3. Учёт классов водных объектов (G) и растительных классов (A–D) позволяет корректно воспроизводить термическое влияние незамерзающего участка Енисея и плотной застройки центра на приземный слой атмосферы, а также оценивать смягчающую роль зелёной инфраструктуры на уровне отдельных кварталов [14]. Подготовленная карта передана в вычислительный блок для постановки модели WRF.

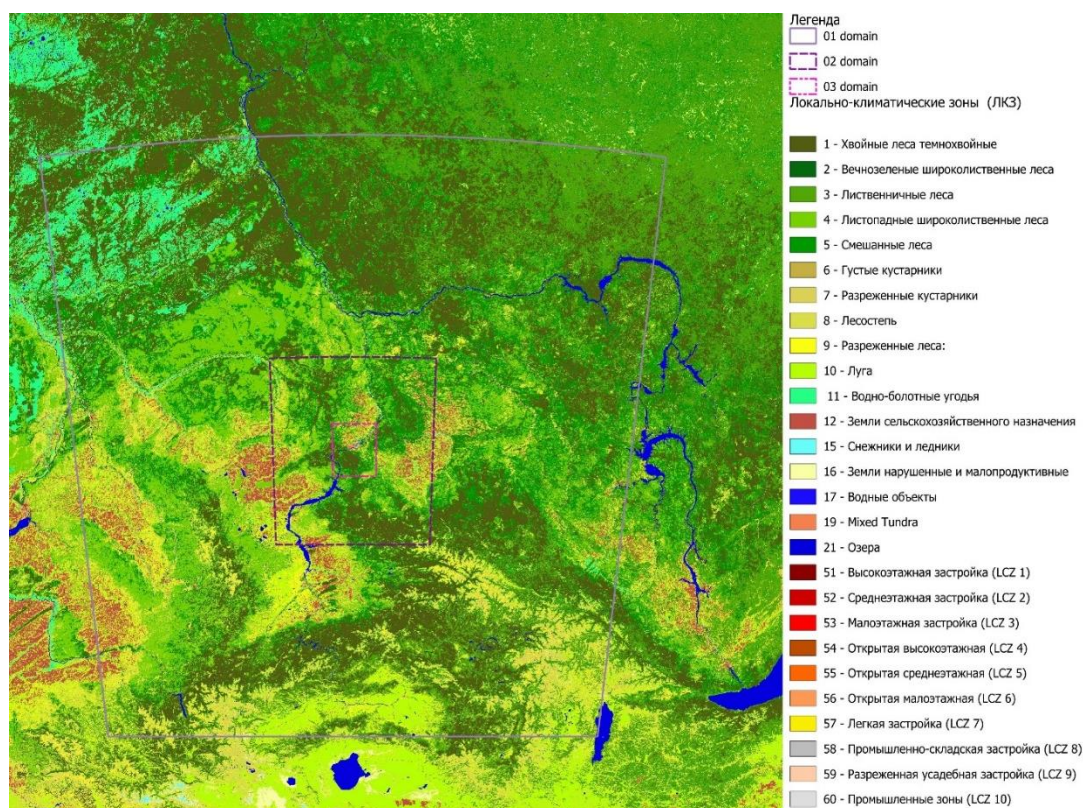


Рис. 3. Общий вид поквартальной карты LCZ городского округа город Красноярск с выделенными расчётными доменами.

Выполнено построение, верификация и тематическое уточнение поквартальной карты локально-климатических зон городского округа город Красноярск. Исходная растровая классификация LCZ Generator (100 м) агрегирована по границам 126 населённых пунктов, очищена от пиксельного шума и дополнена переходными классами; природные классы A–D уточнены по данным NDVI Sentinel-2. Итоговая карта содержит 31 категорию, экспортирована в формат GeoTIFF с разрешением 100 м и зарегистрирована в единой базе геоданных цифрового двойника атмосферы города, откуда передаётся в модель WRF в качестве параметров подстилающей поверхности.

Дальнейшие работы предусматривают калибровку параметров модели WRF по данным карты LCZ и сопоставление расчётных полей температуры с материалами спутникового мониторинга, а также расширение состава слоёв единой базы геоданных цифрового двойника атмосферы города.

Список литературы

1. Stewart I. D., Oke T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies //

- Bulletin of the American Meteorological Society. — 2012. — Vol. 93, No. 12. — P. 1879–1900. — DOI 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
2. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities / B. Bechtel et al. // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2015. — Vol. 4, No. 1. — P. 199–219. — DOI 10.3390/ijgi4010199.
3. A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science / M. Demuzere et al. // Earth System Science Data. — 2022. — Vol. 14, No. 8. — P. 3835–3873. — DOI 10.5194/essd-14-3835-2022.
4. WUDAPT: An efficient way to map local climate zones and its application to urban climate modelling / O. Brousse et al. // Urban Climate. — 2016. — Vol. 17. — P. 65–87. — DOI 10.1016/j.uclim.2016.08.004.
5. Pyanova E. A., Penenko V. V., Faleychik L. M. Simulation of winter mesoclimates in Krasnoyarsk urban agglomeration // Proceedings of SPIE. — 2017. — Vol. 10466. — Art. 104666J. — DOI 10.1117/12.2287754.
6. Pyanova E. A., Penenko V. V., Faleychik L. M. Numerical modeling of atmospheric dynamics and pollutant transport over the regions with inhomogeneous orography // AIP Conference Proceedings. — 2018. — Vol. 2027. — Art. 030101. — DOI 10.1063/1.5065195.
7. An integrated multiscale urban microclimate model for the urban thermal environment / N. H. Wong et al. // Urban Climate. — 2021. — Vol. 35. — P. 100730. — DOI 10.1016/j.uclim.2020.100730.
8. A Description of the Advanced Research WRF Version 4 / W. C. Skamarock et al. — Boulder: NCAR, 2019. — 145 p. — (NCAR Technical Note ; NCAR/TN-556+STR). — DOI 10.5065/1dfh-6p97.
9. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems / F. Chen et al. // International Journal of Climatology. — 2011. — Vol. 31, No. 2. — P. 273–288. — DOI 10.1002/joc.2158.
10. Demuzere M., Kittner J., Bechtel B. LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps // Frontiers in Environmental Science. — 2021. — Vol. 9. —

Art. 637455. — DOI 10.3389/fenvs.2021.637455.

11. OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap Data. — URL: openstreetmap.org (дата обращения: 05.09.2026).

12. Закон Красноярского края от 15 мая 2025 года № 9-3914 «О территориальной организации местного самоуправления в Красноярском крае» (принят Законодательным Собранием Красноярского края 14 мая 2025 года, подписан Губернатором Красноярского края 15 мая 2025 года, вступил в силу 19 июня 2025 года). — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/2400202505220004/> (дата обращения: 05.09.2026).

13. Sentinel-2 User Handbook. — Issue 1, Rev. 2. — European Space Agency, 2015. — 64 p.

14. Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure / S. E. Gill et al. // Built Environment. — 2007. — Vol. 33, No. 1. — P. 115–133. — DOI 10.2148/benv.33.1.115.

ВЫДЕЛЕНИЕ СЦЕНАРИЕВ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ Г. КРАСНОЯРСКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.В.Заворуев¹, Т.В.Якубайлик¹, О.Э.Якубайлик¹

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, ytv@icm.krasn.ru

В условиях высокой антропогенной нагрузки регулярное возникновение режимов неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) представляет прямую угрозу экологической безопасности и здоровью населения. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки надежной эмпирической основы для детерминированного и статистического математического моделирования качества атмосферного воздуха. Высокий уровень загрязнения приземного воздуха формируется под влиянием метеорологических факторов. Для Красноярска главными драйверами накопления мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$ являются слабый ветер и температурные инверсии. Настоящая работа посвящена выявлению и систематизации многолетних характеристик вертикальной температурной стратификации и ветрового режима, способствующих ухудшению качества атмосферного воздуха.

В Москве высокий уровень загрязнения приземного воздуха оксидом углерода формируется при слабом ветре в нижних слоях атмосферы и только при наличии приземной или низкой приподнятой инверсии температуры [1]. Эти же два метеопараметра являются определяющими в загрязнении атмосферы г. Томска [2]. Повышение концентрации загрязняющих веществ в воздухе при температурных инверсиях отмечается в Челябинске [3], Улан-Удэ [4] и многих других городах в России и за рубежом, в частности – в Кракове, Париже и Милане [5].

В статье [6] показано, что в зимних условиях Красноярска в 2022–2024 годах главными метеорологическими драйверами накопления загрязняющих веществ, таких как $PM_{2.5}$, являются, во-первых, слабый ветер и, во-вторых, приземные или низко приподнятые температурные инверсии атмосферного воздуха.

Таким образом, для решения поставленной задачи по выявлению и систематизации за многолетний период характерных метеорологических условий, способствующих накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы Красноярска, необходимо проанализировать два метеорологических параметра – скорость ветра и вертикальную температурную стратификацию атмосферы.

Массив данных о вертикальной температурной стратификации атмосферы до высоты 1000 м получен с помощью профилемера МТР-5 в центральной части Красноярска за период с 26.10.2021 по 31.12.2025 (36 211 среднечасовых профилей). Данные о скорости ветра зафиксированы автоматической метеостанцией «Покровка-Красноярск» и синхронизированы с температурными измерениями.

Критерием инверсии служила разность температур ($\Delta T \geq 0,5^\circ\text{C}$) в верхней и нижней границах слоев: 0–200 м (1 класс, приземные), 50–200 м (2 класс, приподнятые), 100–200 м (3 класс, приподнятые), 150–200 м (4 класс, приподнятые) и 200–1000 м (5 класс, приподнятые). Отсутствие инверсии ($\Delta T < 0,5^\circ\text{C}$) отнесено к 0 классу.

В качестве маркерного вещества использовали взвешенные частицы $\text{PM}_{2,5}$. Рассчитывалось среднегородское значение концентрации путем синхронного усреднения данных со всех 20 измерительных постов сети мониторинга ФИЦ КНЦ СО РАН.

1. Статистический анализ распределения инверсий и ветрового режима

За весь исследуемый период отсутствие инверсионных условий (класс 0) зафиксировано в 64,29% случаев (23 280 часов). Стабильная стратификация наблюдалась в 35,71% случаев (12 931 час). Среди инверсионных состояний преобладают приземные инверсии 1 класса — 19,50% (7 060 часов). На долю приподнятых инверсий приходится 16,21% (5 871 час), где подклассы распределились следующим образом: класс 2 — 6,84% (2 477 ч), класс 3 — 2,68% (970 ч), класс 4 — 1,41% (511 ч), класс 5 — 5,28% (1 913 ч).

Средняя скорость ветра (V_{cp}) при отсутствии инверсий максимальна и составляет 3,17 м/с (стандартное отклонение $\Delta = 2,21$ м/с). В условиях инверсий наблюдается нелинейная зависимость скорости ветра от высоты основания слоя.

При приземных инверсиях $V_{ср}$ равна 1,69 м/с ($\Delta = 1,75$ м/с). По мере роста высоты основания до 50–100 м скорость ветра падает до минимума: 0,73 м/с ($\Delta = 0,69$ м/с) для 2 класса и 0,71 м/с ($\Delta = 0,75$ м/с) для 3 класса. При дальнейшем подъеме основания инверсии ветровой режим усиливается: в 4 классе $V_{ср} = 1,14$ м/с ($\Delta = 1,22$ м/с), в 5 классе — 2,73 м/с ($\Delta = 1,86$ м/с). Попарный тест Тьюки (FWER = 0,05) подтвердил статистическую неразличимость классов 2 и 3, что позволяет объединить их в единый тип низких приподнятых инверсий (50–100 м).

Ветровой режим был классифицирован по трем ключевым градациям скорости: слабый ветер, характеризующий застойные ситуации - в интервале от 0 до 1,5 м/с; умеренно-слабый ветер, отражающий переходное состояние приземного слоя - от 1,5 до 2,5 м/с; умеренный/сильный ветер, обеспечивающий интенсивную динамическую турбулентность и очищение воздушного бассейна - свыше 2,5 м/с.

Повторяемость градаций ветра указывает, что доля слабого ветра наиболее высока в объединенном классе инверсий 2–3 (88,0%) и классе 4 (77,5%). В 1 классе доля слабого ветра ниже (62,7%), что связано со спецификой диссипации приземных инверсий при усилении воздушных потоков до 5 м/с. В 5 классе преобладает умеренный и сильный ветер, доля которого составляет 50,1%.

Сезонный анализ выявил, что приземные инверсии распределены относительно равномерно с максимумом осенью (2 019 ч) и зимой (1 916 ч). Низкие приподнятые инверсии (классы 2–3) резко преобладают зимой (1 679 ч) по сравнению с летом (684 ч) и весной (635 ч). Высокие инверсии 5 класса носят ярко выраженный зимний характер (1 247 ч), практически исчезая летом (63 ч) и весной (76 ч).

2. Взаимосвязь метеопараметров с уровнем загрязнения $PM_{2,5}$

Анализ по фактору сезонности демонстрирует, что зима является наиболее критическим периодом. В режиме «все ветра» зимний медианный уровень $PM_{2,5}$ достигает максимума при низких приподнятых инверсиях (классы 2–3) — 75,0 мкг/м³. При приземных инверсиях медиана составляет 51,9 мкг/м³, при инверсиях от 150 м — 39,1 мкг/м³, а от 200 м — 16,7 мкг/м³. Весной и осенью медианные значения для классов 2–3 колеблются в пределах 14–18 мкг/м³. Летом

межквартильный размах сужается, а медианы всех классов выравниваются в диапазоне 8–10 мкг/м³.

В условиях «только слабого ветра» зимние медианы возрастают: до 76,1 мкг/м³ для классов 2–3 и до 65,7 мкг/м³ для приземных инверсий. Весной приземные слои детерминируют медиану в 20,0 мкг/м³. Особая ситуация фиксируется осенью: инверсии на высоте более 200 м при слабом ветре приводят к аномальному росту медианы PM_{2,5} до 24,3 мкг/м³, что превосходит показатели приземных инверсий. Режим «слабого и умеренно-слабого ветра» повторяет описанные тенденции с незначительным снижением медиан (зимой: 75,7 мкг/м³ для классов 2–3 и 62,9 мкг/м³ для класса 1).

Переход к режиму «умеренного/сильного ветра» приводит к падению концентраций в 2–8 раз. Наиболее выражен очищающий эффект для приземных инверсий зимой, где медиана падает до 8,2 мкг/м³. Для зимних приподнятых инверсий классов 2–3 и класса 4 медианы при сильном ветре остаются относительно высокими — 29,8 и 28,1 мкг/м³ соответственно, что свидетельствует об их устойчивости к вымыванию. Летние медианы при сильном ветре снижаются до абсолютного минимума — 3,5–5,5 мкг/м³.

3. Продолжительность инверсионных периодов и сценарное моделирование

Продолжительность инверсий находится в обратной зависимости от скорости ветра. Максимальное сокращение медианной длительности при росте скорости ветра наблюдается летом (с 8 до 1,5 ч), минимальное — в зимний период (с 11 до 4 ч). Зимой при слабом ветре регистрируются экстремально затяжные инверсии с максимальной длительностью до 312 часов (период с 21.01.2024 по 05.02.2024), что генерирует пиковые концентрации PM_{2,5} до 110,5 мкг/м³ (при медиане сценария 46,9 мкг/м³). Для сравнения, максимальная длительность инверсий при слабом ветре весной составляет 31 ч (медиана PM_{2,5} 18,4 мкг/м³), летом — 18 ч (медиана 8,8 мкг/м³), осенью — 103 ч (медиана 17,7 мкг/м³). Количество застойных явлений максимально летом при слабом ветре (302 случая), однако их кратковременность нивелирует экологические риски.

Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы:

- сезон года выступает первичным фактором накопления $PM_{2,5}$: в зимний период из-за дополнительных антропогенных нагрузок и устойчивой стратификации концентрации загрязнителя на порядок выше летних при любых метеоусловиях;

- скорость ветра является главным модератором длительности инверсий. Слабый ветер обуславливает наиболее затяжные инверсии (до 312 ч зимой), приводя к росту концентраций $PM_{2,5}$ до экстремальных значений ($110,5 \text{ мкг/м}^3$);

- тип инверсии определяет характер вертикального распределения примесей. Наибольшую опасность представляют приземные и низкие приподнятые инверсии (50–100 м) в сочетании со слабым ветром. Сильный ветер эффективно разрушает приземные инверсии, однако приподнятые слои сохраняют высокий потенциал накопления загрязняющих веществ даже при высоких скоростях ветра.

На основе сочетания факторов разработано 13 прогностических сценариев. Системообразующей ее основой является деление по интервалам концентрации взвешенных частиц $PM_{2,5}$: < 5 , 5–10, 10–20, 20–40, 40–60, $> 60 \text{ мкг/м}^3$. Каждому диапазону соответствует устойчивый набор определяющих факторов.

Диапазон $PM_{2,5} > 60 \text{ мкг/м}^3$ реализуется исключительно зимой при слабом ветре в условиях приподнятых инверсий 50–100 м (медиана $PM_{2,5}$ $76,1 \text{ мкг/м}^3$) или приземных инверсий (медиана $65,7 \text{ мкг/м}^3$). Диапазон 40–60 мкг/м^3 также характерен для зимы и слабого ветра при инверсиях на высотах 150 м (медиана $46,8 \text{ мкг/м}^3$) и 200 м (медиана $40,1 \text{ мкг/м}^3$). Диапазон 20–40 мкг/м^3 фиксируется зимой при сильном ветре для инверсий 50–100 м (медиана $29,8 \text{ мкг/м}^3$), а также при умеренно-слабом ветре для приземных инверсий (медиана $21,5 \text{ мкг/м}^3$). В осенний период аналогичный диапазон (20–40 мкг/м^3) достигается при слабом ветре и инверсиях выше 200 м. Минимальные уровни ($< 5 \text{ мкг/м}^3$) устойчиво регистрируются летом (медиана $3,5 \text{ мкг/м}^3$) и осенью (медиана $3,5 \text{ мкг/м}^3$) при сильном ветре.

Выделена ведущая роль сезона – зимой (отопительный период, устойчивая стратификация) концентрации на порядок выше, чем летом, при

любых скоростях ветра и типах инверсий. Все сценарии с концентрациями >40 мкг/м³ приходятся исключительно на зимние месяцы.

Скорость ветра – ключевой модератор:

- *Слабый ветер* – создаёт застой, увеличивает длительность инверсий (медиана 8–11 ч) и обеспечивает максимальные концентрации (зимой до 76,1 мкг/м³).

- *Сильный ветер* выступает как эффективный фактор очищения, сокращая длительность инверсий до 1,5–5 ч и снижая концентрации в 2–8 раз по сравнению со слабым ветром в том же сезоне.

Тип и высота температурной инверсии определяют вертикальное распределение загрязнителей:

- *Приземные инверсии и приподнятые типы 2–3* (высоты 50–100 м) – наиболее опасны при слабом ветре, давая максимальные значения.

- *Инверсии на высоте 150 м* занимают промежуточное положение, а *на высоте 200 м* – обычно дают более низкие концентрации, **однако осенью при слабом ветре** именно этот тип демонстрирует аномально высокий уровень (до 24,3 мкг/м³), что связано с задержкой загрязнённых слоёв на средней высоте в переходный сезон.

Длительность инверсии прямо коррелирует с накоплением – медианная длительность 10–11 ч при слабом ветре зимой сопровождается концентрациями >60 мкг/м³, а при коротких (1,5 ч) летних инверсиях даже в застойных условиях уровни не превышают 10 мкг/м³.

Экстремальные эпизоды – максимальная зафиксированная длительность инверсии (312 ч, зима, слабый ветер, календарный период с 21.01.2024 19:00 по 05.02.2024 10:00) приводит к пиковым концентрациям до 110,5 мкг/м³, что значительно превышает медианные значения для того же сценария и требует особого внимания при прогнозировании.

Проведенный анализ многолетних данных температурного профилемера МТР-5 (за период 2021–2025 гг.) позволил количественно оценить вклад сезона года, скорости ветра и типа инверсии в накопление РМ_{2,5} в приземном слое атмосферы Красноярска. Полученные результаты согласуются с литературными

данными и уточняют их применительно к условиям крупного промышленного города.

Список литературы

4. 1. Кузнецова И.Н. Метеорологические предпосылки формирования зимних эпизодов высокого загрязнения воздуха в г. Москва / И.Н.Кузнецова, М.И.Нахаев, И.Ю.Шалыгина, Е.А.Лезина // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 3. – С. 48-59.
5. 2. Starchenko A.V. Numerical Simulation of Meteorological Conditions and Air Quality above Tomsk, West Siberia / A.V.Starchenko, E.A.Shelmina, L.I.Kizhner // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11. Iss. 11. – P. 1148. – DOI: 10.3390/atmos11111148.
6. 3. Ячменёва Н.В. Повторяемость инверсий и их влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Челябинске / Ячменёва Н.В., Гольвей А.Ю. // Вестник Челябинского государственного университета. – 2011. – № 5 (220). – С. 84-89. – EDN: MNGVCM.
7. 4. Калашников С.В. Вклад источников индивидуального теплоснабжения в загрязнение воздуха городов Сибири и его снижение бытовыми электрофильтрами / Калашников С.В., Номоев А.В., Чимытов Т.А., Южаков И.А., Самбуу М., Цырен-Очир С.Э. // Вестник РУДН. Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2026. – Т. 34. – № 3. – С. 276-390. – DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-376-390.
8. 5. Rowland O.E. Comparative analysis of meteorological parameters and their relationship with NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} and O₃ concentrations at selected urban air quality monitoring stations in Krakow, Paris, and Milan // Discover Environment. – 2024. – Vol. 2. – article 75. – DOI: 10.1007/s44274-024-00060-2.
9. 6. Шапарев Н.Я. Формирование зимних температурных инверсий в атмосфере г. Красноярска и их последствия / Н.Я. Шапарев, А.В. Токарев, О.Э. Якубайлик // Оптика атмосферы и океана. – 2026. – Т. 39. – № 6. – С. 520–527. – DOI: 10.15372/AOO20260609.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ И ЧС С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПРОВЕРКИ ТРЕВОЖНЫХ ГИПОТЕЗ

Н.С. Изупов

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

ron1230@yandex.ru

Аннотация. В статье развивается концептуальная модель интеллектуальной системы обеспечения безопасности территорий Российской Федерации. В дополнение к паспортам безопасности территорий и планам действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций предложена информационная основа, интегрирующая документы предварительного планирования с системой анализа больших данных. Это обеспечивает выявление слабых сигналов и критических сочетаний событий, предшествующих возникновению аварий и ЧС, на основе чего формируются предиктивные гипотезы. С опорой на теорию высоконадежных организаций (HRO) предложен порядок преобразования выявленных сигналов в проверяемые гипотезы. Особая роль отведена беспилотным авиационным системам (БАС), рассматриваемым в качестве ключевого инструмента проверки гипотез и снижения уровня неопределенности обстановки.

Ключевые слова: безопасность территорий, РСЧС, БАС, беспилотные авиационные системы, слабые сигналы, HRO, единый банк знаний, слияние данных, ситуационное управление.

Введение

Обеспечение комплексной безопасности территорий представляет собой многогранную задачу, зависящую от сложного взаимодействия техногенных, природно-климатических, антропогенных и инфраструктурных факторов. Усложнение характера современных аварий и выраженный каскадный сценарий развития чрезвычайных ситуаций предъявляют принципиально новые требования к оперативности и точности систем мониторинга и реагирования. В то же время технологический прогресс открывает качественно иные возможности: прежде

всего это многокритериальный анализ колоссального массива параметров с целью раннего обнаружения скрытых взаимосвязей и латентных предвестников угроз. В этой связи ключевая роль интеллектуальных систем заключается в подготовки обоснованных гипотез для своевременного предупреждения аварий и возможных ЧС.

Нормативная база Российской Федерации задает важную основу. Федеральный закон № 68-ФЗ о защите населения и территорий от ЧС определяет задачи по обеспечении безопасности населения и территорий, а положение о Единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) закрепляет уровни и режимы функционирования системы [1, 2]. Паспорта безопасности территорий систематизируют характеристики территории, угрозы, проживающее население, объекты, инфраструктуру и ресурсы. Планы действий связывают сценарии чрезвычайных ситуаций с порядком реагирования [3, 4]. Однако сохраняется потребность в совершенствовании систем мониторинга угроз, особенно в части чувствительности к деталям и интерпретации слабых сигналов, требующих превентивного внимания.

Практика МЧС России показывает, что беспилотные авиационные системы (БАС) уже используются для контроля зон чрезвычайных ситуаций, определения их границ и объектов поиска, воздушной разведки, мониторинга пожароопасной, паводковой и ледовой обстановки, а также аэрофотосъемки с топографической привязкой [5].

Цель статьи — сформировать концептуальную основу интеллектуальной системы безопасности территорий, реализующую анализ больших массивов гетерогенных данных с опорой на онтологию территории, что обеспечивает целенаправленный поиск и интерпретацию слабых сигналов. На их основе генерируются предиктивные гипотезы о потенциально возможном развитии аварии или ЧС и выдаются предложения по адресной проверке. В качестве ключевого инструмента повышения точности прогноза выступают беспилотные авиационные системы, способные оперативно проверить гипотезу и снизить уровень неопределенности.

Материалы и методы исследования

Методологическую основу исследования составляют системный, структурно-функциональный, риск-ориентированный и ситуационный подходы. Нормативную базу формируют положения законодательства в области защиты от ЧС, документы РСЧС, а также требования к паспортам безопасности и планам действий [1-4, 6-7]. Научно-теоретический фундамент работы опирается на концепции онтологического моделирования сложных систем, теории слияния гетерогенных данных и модели ситуационной осведомленности. В исследовании синтезированы подходы к оценке территориальных рисков и принципы теории высоконадежных организаций, что позволило адаптировать методы анализа слабых сигналов к задачам превентивного управления безопасностью территорий [8-17].

Информационная основа интеллектуальной системы

Паспорт безопасности территории в системе интерпретируется как канонический слой относительно устойчивых сведений: границы, природно-климатические особенности, население и уязвимые группы, объекты экономики, инфраструктура, силы и средства, источники риска, зоны возможного воздействия опасных факторов. План действий по предупреждению и ликвидации ЧС интерпретируется как процедурный слой: сценария ликвидации ЧС, ответственные лица и организации, последовательность задач, ресурсы, ограничения и ожидаемые результаты. Третий, оперативный слой формируется из наблюдений, сообщений и прогнозов. Данный слой не переписывает утвержденный план действий, а анализирует изменения обстановки, несоответствия и опасные признаки возможной аварии или ЧС, формирует гипотезу и предлагает пути ее проверки.

Для преобразования данных в знания используются следующие положения. Во-первых, документальные сведения, наблюдения и прогнозы хранятся отдельно, но связываются общей онтологией. Во-вторых, каждое наблюдение получает метаданные качества, времени, географии и происхождения. В-третьих, слабый сигнал не признается событием

автоматически: он порождает гипотезу, которую система сопоставляет с другими источниками, графом зависимостей и сценариями плана действий. В-четвертых, вывод системы представляется вместе с основанием, уровнем неопределенности и вариантом проверки. В-пятых, права на просмотр, подтверждение и изменение данных задаются функциональной цифровой границей пользователя.

Территория описывается как ориентированный набор взаимосвязанных характеристик, где:

- О - объекты (здания и сооружения);
- Н - источники и виды угроз;
- Н - население и уязвимые группы;
- I – объекты инфраструктуры;
- R - силы и средства;
- S — сценарии;
- A — действия;
- G — пространственные и функциональные связи;

ЕДИНАЯ ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ТЕРРИТОРИИ



Рис. 1. Единая цифровая модель территории.

Для каждого элемента системы фиксируются: значения или содержание наблюдения (v_i) временная характеристика (t), пространственные данные (g), источник информации (s), качество данных (q), происхождение данных (m) и

доверие к данным (с). Такая структура отличает исходный факт от вычисленного признака, прогноза, экспертной оценки и сообщения, поступившего без независимого подтверждения.

Онтология создает общий словарь для территориальных и функциональных подсистем: например, сообщение о превышении уровня воды, снимок БАС, прогноз осадков и состояние автодороги могут быть связаны с одной зоной, маршрутом эвакуации, объектом жизнеобеспечения и соответствующим сценарием.

Источники данных и роль БАС

Таблица 1.

Источники данных, типы слабых сигналов
и их интерпретация в системе.

Группа источников	Примеры поступающих данных	Признаки слабого сигнала	Использование в системе
Документальные и реестровые	Паспорта, планы действий, ГИС, реестры объектов и ресурсов	Несоответствие актуальным сведениям; истечение периода проверки; изменение связи объектов	Базовый профиль, допустимые сценарии, контроль актуализации

Группа источников	Примеры поступающих данных	Признаки слабого сигнала	Использование в системе
Спутниковые и гидрометеорологические	Данные дистанционного зондирования, прогнозы, уровни воды, осадки, ветер, температура	Тепловая, дымовая, гидрологическая или метеорологическая аномалия; неблагоприятный тренд	Широкий обзор, прогнозирование и постановка задачи адресной проверки
БАС и полезные нагрузки	Фото-, видео- и тепловизионные данные; при наличии — газоаналитика, лидарные или мультиспектральные измерения	Подтверждение аномалии, повреждение, задымление, изменение границ, блокирование маршрута, объект поиска	Детальная разведка, верификация гипотез, построение актуальной гео модели, контроль исполнения
Стационарные датчики и автоматика	Температура, давление, уровень, расход, вибрация, утечка; сообщения АСУ и телеметрии	Отклонение от диапазона, дрейф параметра, аварийное или нестабильное состояние	Непрерывное точечное наблюдение, раннее обнаружение и формирование запроса к БАС

Группа источников	Примеры поступающих данных	Признаки слабого сигнала	Использование в системе
Системы контроля зданий и инфраструктуры	Диспетчеризация, контроль доступа, энергопотребление, инженерные системы, видеоаналитика	Сбой оборудования, атипичная нагрузка, нарушение эвакуации, потеря связи или питания	Оценка уязвимости объекта, воздействия на людей и каскадных последствий
Движение, связь и оперативные сообщения	Интенсивность и скорость движения, состояние маршрутов, обращения, сообщения дежурных смен	Скопление людей, резкое падение пропускной способности, перекрытие пути, противоречивые сообщения	Проверка доступности, приоритизация маршрутов, уточнение обстановки и ресурсов

БАС занимают особое место в этой архитектуре, поскольку имеют широкие функциональные возможности оперативного реагирования, могут быстро обследовать территорию, снять неопределенность о конкретном событии и сформировать отчет, привязанный ко времени и местности. БАС превращаются в средство активного уточнения данных.

Слабые сигналы и принципы высоконадежных организаций

Под слабым сигналом в настоящей модели понимается единичное, неполное или пока не подтвержденное свидетельство изменения состояния объекта, территории или функциональной системы, которое может предшествовать развитию ЧС. Понятие слабых сигналов впервые ввел Игорь Ансофф в 1970-х годах, по его мнению, внимательность к слабым сигналам

способствует распознаванию стратегических изменений [16]. Для задач безопасности территории - это актуально, т.к. может позволить своевременно прибегнуть к превентивным мерам.

Принципы теории высоконадежных организаций уделяют внимание сбоям, отказам, отклонению от нормы, исключает преждевременное упрощение, передают информацию для оценки компетентному специалисту [17]. В интеллектуальной системе эти принципы превращаются в проверяемые правила обработки данных и организации взаимодействия.

Таким образом, слабый сигнал становится важным пазлом в общей картине контекста происходящего. Например, ситуация 1 (рис. 2). Электростанция в течение предшествующих шести месяцев зафиксировала аварийное отключение, обусловленное высокой ветровой нагрузкой. В текущий период прогнозируется аналогичный ветровой режим, одновременно в предшествующие сутки зарегистрированы повышенные осадки, что привело к переувлажнению грунтового дорожного покрытия на подъездном маршруте к объекту. Совокупность указанных факторов формирует комплексный слабый сигнал: возрастает вероятность повторного аварийного отключения подстанции, при этом существует риск невозможности оперативного доступа ремонтной бригады к объекту вследствие неудовлетворительного состояния подъездного пути. Формируется превентивная рекомендация: провести контроль качества грунтового покрытия на маршруте доступа к подстанции до наступления прогнозируемого ветрового события. Ситуация 2 (рис. 3). На территории региона в весенний период действует особый противопожарный режим на фоне устойчивой засушливой погоды. На железнодорожном переезде произошло дорожно-транспортное происшествие с разгерметизацией автоцистерны, перевозившей дизельное топливо, в результате разлива горючая жидкость распространилась по склону и пропитала сухую растительность на площади около 50 м². Ключевым слабым сигналом в данной обстановке является резкое усиление порывистого ветра, направление которого ориентировано в сторону населенного пункта, расположенного в 5 км от места происшествия. Сочетание горючего субстрата, сухой растительности и порывистого ветра формирует сценарий

быстрого распространения пожара по направлению к поселению. В качестве превентивных мер система рекомендует: организовать заблаговременное оповещение жителей населенного пункта, чьи домовладения примыкают к лесному массиву с подветренной стороны, инициировать тепловизионное обследование территории по вероятному маршруту распространения огня в целях обнаружения и эвакуации людей, находящихся в потенциально опасной зоне (грибники, охотники, отдыхающие).

Обе ситуации демонстрируют, что ни один из перечисленных факторов по отдельности не квалифицируется как событие чрезвычайного характера; однако их сопряжение в рамках единой онтологии территории и временного окна позволяет системе сформировать гипотезу развития ЧС

Заключение

В работе сформирована концептуальная основа интеллектуальной системы безопасности территорий, предназначенная для формирования превентивных мероприятий на основе анализа разнородных данных мониторинга, документов планирования и сведений об оперативной обстановке.

Онтологическое представление позволяет связать объекты, источники угроз, население, инфраструктуру, силы и средства, сценарии, действия, а также пространственные и функциональные взаимосвязи. Фиксация значения наблюдения, времени, геометрии, источника, качества, происхождения и степени доверия обеспечивает контроль над данными.

Особая роль в предложенной системе отводится беспилотным авиационным системам. БАС рассматриваются не только как средство получения фото- и видеоматериалов, но и как активный инструмент адресной проверки гипотез. Это позволяет сократить неопределенность, возникающую при анализе данных, поступающих от различных источников (спутниковых систем, стационарных датчиков, ведомственных информационных систем, дежурных служб, очевидцев).

Информационная система, построенная на принципах высоконадежных организаций, уделяет особое внимание слабым сигналам, способных привести к

развитию ЧС. Рассмотренные сценарии показывают, что опасность может формироваться постепенно, повышая риск аварии или ЧС, как результат сочетания различных факторов. Поэтому система должна своевременно формировать для компетентного специалиста обоснованную рекомендацию по проверке и предупреждающим действиям.

Перспективы дальнейших исследований связаны с формализацией критериев оценки достоверности и значимости слабых сигналов, разработкой правил их сопоставления с типовыми сценариями, а также с апробацией предложенной модели на ретроспективных и реальных ЧС.

Список литературы

1. Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Официальный сайт МЧС России. URL: <https://06.mchs.gov.ru/deyatelnost/edinyy-reestr-normativnyh-pravovyh-aktov-i-normativnyh-dokumentov-po-pozharnoy-bezopasnosti/normativnye-dokumenty-v-oblasti-go-i-chs/chrezvychaynye-situacii/68-fz-o-zashchite-naseleniya-i-territoriy-ot-chs> (дата обращения: 28.08.2026).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 30.12.2003 № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». Официальный сайт МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/768> (дата обращения: 28.08.2026).
3. Методические рекомендации МЧС России по разработке планов действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. 15.03.2021. URL: https://86.mchs.gov.ru/uploads/resource/2022-04-28/5-2-metodicheskie-rekomendacii_1651137928472221830.docx (дата обращения: 28.08.2026).
4. Методические рекомендации по разработке паспорта безопасности территории муниципального образования. Главное управление МЧС России по Красноярскому краю. URL: <https://24.mchs.gov.ru/deyatelnost/napravleniya-deyatelnosti/grazhdanskaya-zashchita/5-preduprezhdenie-chrezvychaynyh->

- situaciy/5-2-metodicheskie-rekomendacii/5-2-1-metodicheskie-rekomendacii-mchs-rossii/metodichka-po-razrabotke-pasporta-bezopasnosti-territorii-mo (дата обращения: 28.08.2026).
5. Оснащение реагирующих подразделений беспилотными авиационными системами. Официальный сайт МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/finansy-i-zakupki/osnashchenie-reagiruyushchih-podrazdeleniy-bespilotnymi-aviacionnymi-sistemami> (дата обращения: 28.08.2026).
 6. Приказ МЧС России от 28.02.2003 № 105 «Об утверждении требований по предупреждению чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения». Официальный сайт МЧС России. URL: <https://47.mchs.gov.ru/deyatelnost/stranicy-s-glavnoy/zakonodatelstvo/normativno-pravovye-dokumenty-v-oblasti-go-i-chs/prikaz-mchs-rossii-ot-28-02-2003-105-ob-utverzhdenii-trebovaniy-po-preduprezhdeniyu-chs-na-potencialno-opasnyh-obektah-i-obektah-zhizneobespecheniya> (дата обращения: 28.08.2026).
 7. Источники возникновения чрезвычайных ситуаций. Официальный сайт МЧС России. URL: https://mchs.gov.ru/deyatelnost/bezopasnost-grazhdan/vidy-i-harakteristiki-istochnikov-chrezvychaynyh-situaciy_3 (дата обращения: 28.08.2026).
 8. Москвичев В. В., Ничепорчук В. В., Потапов В. П., Тасейко О. В. Цифровой паспорт безопасности территорий промышленных агломераций и регионов // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26, № 6. С. 110–132. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.6.008.
 9. Москвичев В. В., Постникова У. С., Тасейко О. В. Управление техногенной безопасностью на основе риск-ориентированного подхода // Проблемы управления. 2022. № 3. С. 16–28.
 10. Тасейко О. В. Классификация и модели оценки рисков в задачах обеспечения территориальной безопасности // Вычислительные технологии. 2025. Т. 30, № 6. С. 130–142.

11. ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
12. ISO 22320:2018. Security and resilience — Emergency management — Guidelines for incident management. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
13. Hall D. L., Llinas J. An Introduction to Multisensor Data Fusion // Proceedings of the IEEE. 1997. Vol. 85, No. 1. P. 6–23. DOI: 10.1109/5.554205.
14. Gruber T. R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5, No. 2. P. 199–220. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
15. Endsley M. R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems // Human Factors. 1995. Vol. 37, No. 1. P. 32–64. DOI: 10.1518/001872095779049543.
16. Ansoff H. I. Managing Strategic Surprise by Response to Weak Signals // California Management Review. 1975. Vol. 18, No. 2. P. 21–33. DOI: 10.2307/41164635.
17. Weick K. E., Sutcliffe K. M., Obstfeld D. Organizing for High Reliability: Processes of Collective Mindfulness // Research in Organizational Behavior. 1999. Vol. 21. P. 81–123.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЕМЕРА МТР-5 В Г. КРАСНОЯРСК¹

Е.Д.Кареева¹, Ю.В.Шанько¹

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН,

e.d.karepova@icm.krasn.ru, shy70@mail.ru

Одним из важных показателей качества воздуха в городах является концентрация мелкодисперсных частиц PM_{2.5}. Структура источников загрязнения приземного слоя атмосферы Красноярска традиционна для большинства промышленных центров – это выбросы промышленных предприятий, теплоэнергетики, индивидуального печного отопления и автотранспорта. Существенную роль в накоплении загрязнений играют рельеф города и метеорологические условия, ограничивающие рассеивание примесей. Наиболее неблагоприятные эпизоды обычно формируются в холодный период года при слабом ветре и устойчивой стратификации атмосферы.

Особое значение для накопления загрязнений имеют температурные инверсии – атмосферные слои, в которых температура повышается с высотой. Обычно в дневное время нагрев поверхности усиливает перемешивание воздуха и загрязняющие вещества поднимаются вверх и рассеиваются в большом объеме. Температурная инверсия препятствует вертикальному движению воздуха и ограничивает подъем загрязняющих веществ. При слабом ветре это создает условия для накопления в приземном слое PM_{2.5}, регулярно поступающих в атмосферу промышленного города от транспорта, отопительных установок и промышленных предприятий.

Поэтому измерений температуры только на метеорологической площадке для прогнозирования эпизодов повышенного загрязнения воздуха в городе недостаточно, важен анализ вертикальных профилей температуры. В Красноярске с 2021 года работает температурный профилемер МТР-5 [1–2]. Мы проанализировали данные о вертикальных профилях температур за период 26.10.2021 16:35 — 31.12.2025 23:55 (шаг измерений 5 мин) со стационарного поста мониторинга Качинский и описали связь данных с профилемера с синоптическими режимами. В дальнейшем этой информацией планируется

¹ Работа поддержана грантом РФФИ 24-71-10022.

обогащать данные о метеопараметрах и концентрациях загрязнителей для целей обоснования прогноза динамики загрязнений в приземном слое атмосферы города.

Каждая запись в накопленной базе данных об измерениях температурного профилемера МТР-5 – это данные о вертикальном профиле температуры для высот от 0 до 1 км от уровня поста с переменным шагом измерений по высоте:

- первые 100 м шаг измерения в записи составляет 25 м, но данные на высотах 25 м и 75 м получены осреднением двух соседних измерений, поэтому реально шаг измерения 50 м;

- от 100 м до 500 шаг измерения 50 м;

- от 500 м до 1 км шаг измерения в записи, по-прежнему, 50 м, но данные на высотах 550, 650, 750, 850 и 950 м получены осреднением двух соседних измерений, поэтому реально шаг измерения 100 м;

- кроме того профилемер выдает дополнительную информацию, которую мы не использовали для анализа.

Таким образом, каждому моменту времени соответствует 16 измерений температуры, и данные с профилемера за сутки, по сути, являются многомерным временным рядом. Причем, если рассматривать температуру, измеренную профилемером на одном уровне как отдельный временной ряд, то эти ряды качественно имеют такое же поведение, как и ряды температур. В целом распределения температуры, рассмотренные по сезонам (зима, весна, лето, осень), близки к нормальным. Дисперсионный анализ по сезонам и оценка доверительных интервалов показывают, что распределение температуры имеет выраженную трехмодальную структуру, соответствующую зиме, лету и межсезонью; при этом зимний сезон характеризуется тяжелым «хвостом» в область низких отрицательных температур, а летом дисперсия заметно меньше. Сохраняется суточная и годовая сезонность. Большой интерес представляет именно исследование многомерного временного ряда как целого, что и будет описано далее.

Отметим, что для исследования интересны не сами температуры, а именно их градиенты между уровнями. Градиент температуры на слое вычисляется как

$$\nabla T_i = \frac{T_{i+1} - T_i}{h_i}, i = 1, \dots, 15, \quad (1)$$

где T_i – температура на i -ой высоте, h_i – перепад высот между i -м и $i+1$ -м слоями. Таким образом, для градиента температур рассматривалось 15 значений.

Общее представление о динамике такого многомерного ряда дает тепловая карта, соответствующая нескольким дням.

На рис. 1, 3 изображены характерные тепловые карты осредненных за час профилей температуры для разных периодов. На карте каждым суткам соответствует вертикальный столбик, отделенный от других суток белой вертикальной границей. Столбик состоит из 24-х вертикальных цветных полос, соответствующих каждому часу суток. Таким образом, по оси абсцисс откладывается время в часах. Каждый часовой столбик по вертикали разбит на 16 ячеек. Ордината нижней границы каждой ячейки соответствует высоте измерения в профиле температур. Каждая ячейка окрашена цветом, соответствующим значению температуры на ее нижней границе. Таким образом, по оси ординат откладываются высоты в м от уровня поста. Цветовая шкала значений температур приведена справа.

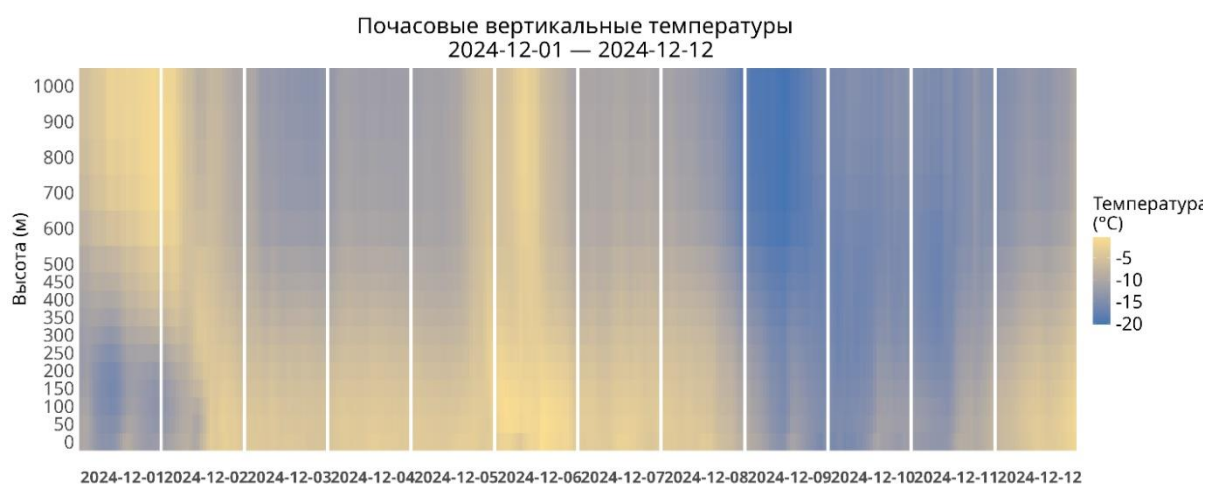
Для этих же периодов на рис. 2, 4 изображены аналогичные по построению тепловые карты градиентов температур между слоями. На этих графиках нижняя граница ячейки соответствует значению i в (1), соответственно, отображается 15 ячеек в столбике.

В норме температура убывает с высотой, т.е. градиент отрицательный, причем у поверхности обычно модуль градиента больше, чем на высоте. Однако, в вечернее и ночное время за счет более быстрого остывания твердой поверхности по сравнению с воздухом, градиенты температуры в приземном слое близки к нулю или даже положительны (на высоте теплее, чем у поверхности). Это явление называется *приземной* температурной инверсией. Но днем, когда поверхность прогревается, вновь появляется выраженный отрицательный градиент, температурная инверсия разрушается. Отметим, что летом суточный ход градиента температур в приземном слое выраженнее, чем в зимнее время, и наблюдается на большей протяженности (сравните рис. 2 (а) и (б)).

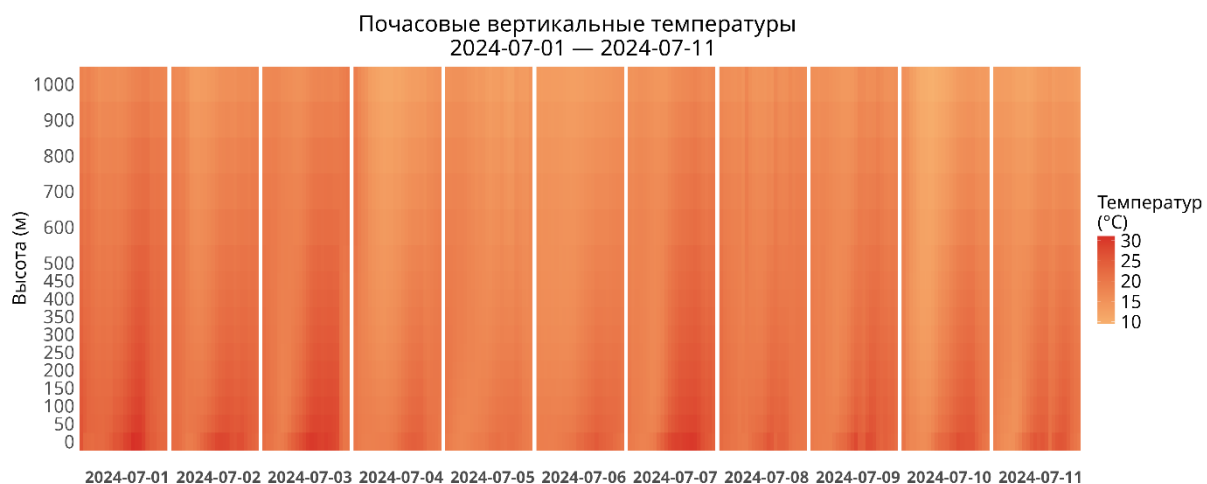
На рис. 1(а) и 2(а) отображена динамика профилей температуры и ее градиентов зимой, в период с 01.12.2024 г. по 12.12.2024 г. Заметим, что характерное фоновое поведение градиентов температур можно наблюдать с

3.12.2023 с непродолжительным нарушением 06.12.2023 г. В целом зимой в Красноярске чаще происходит смена фоновой динамики на аномальную.

На рис. 1 (б) и 2 (б) динамика отображена для спокойного фонового летнего периода с 01.07.2024 г. по 11.07.2024 г. Действительно, «хвост» околонулевых градиентов в ночные и утренние часы на рис. 2(б) поднимается значительно выше, чем на рис. 2(а). Отметим, что в изображенные на рис. 1–2 периоды концентрация PM2.5 в приземном слое в городе была низкой, НМУ не объявлялись.



а)



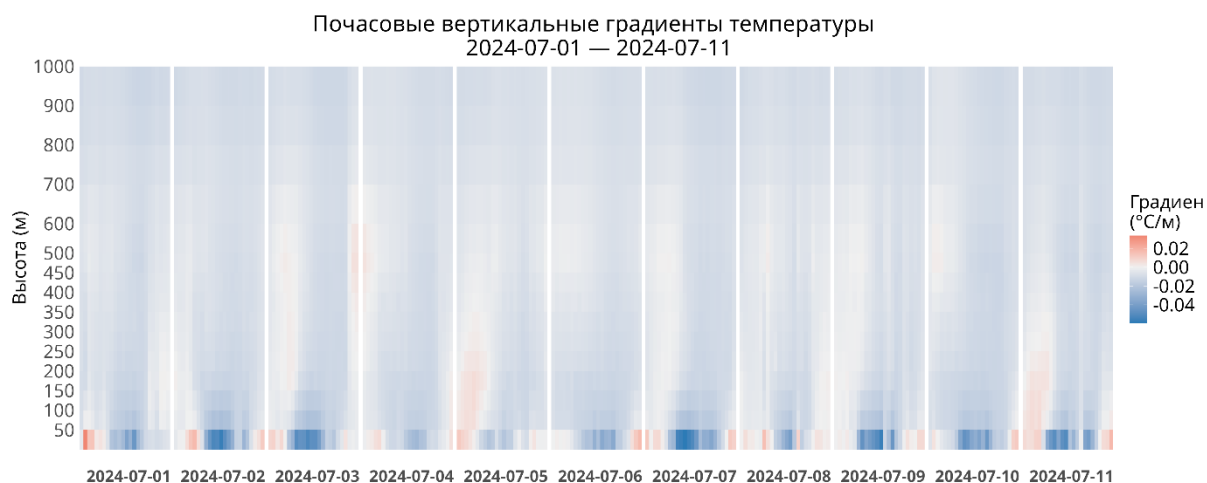
б)

Рис. 1. Тепловая карта профилей температуры: а) в *зимний* период; б) в *летний* период. Период включает дни с малыми концентрациями PM2.5 в приземном слое атмосферы

На рис. 3(а) и 4(а) отображаемый зимний период захватывает режим НМУ, объявленный Среднесибирским УГМС с 16 часов 25.12.2021 г. по 19 часов 29.12.2021 г. По поведению профилей градиентов температур мы видим, что формирование устойчивой температурной инверсии начинается в верхних слоях за 5 дней до объявления НМУ. Собственно, в момент объявления НМУ инверсия спустилась вниз, к 50 м над уровнем поста. Такие инверсии называются приподнятыми, они связаны с глобальными синоптическими режимами, способствующими запираению холодного воздуха в приземном слое. Обратное развитие инверсии до нормальной зимней динамики тоже начинается в верхних слоях атмосферы, постепенно градиенту возвращается фоновый суточный ход. В момент снятия режима НМУ инверсия остается только в самом нижнем слое.

На рис. 3(б) и 4(б) отображаемый летний период захватывает режим НМУ, объявленный Среднесибирским УГМС с 19 часов 13.07.2024 г. по 16 часов 16.07.2024 г. На тепловой карте мы видим, что регулярная инверсионная структура также как и в зимний период начинает складываться за несколько суток до официального объявления НМУ. Однако летом даже в период НМУ сохранена суточная динамика формирования и разрушения как приземной, так и приподнятой инверсии.





б)

Рис. 2. Тепловая карта профилей градиентов температуры: а) в *зимний* период;

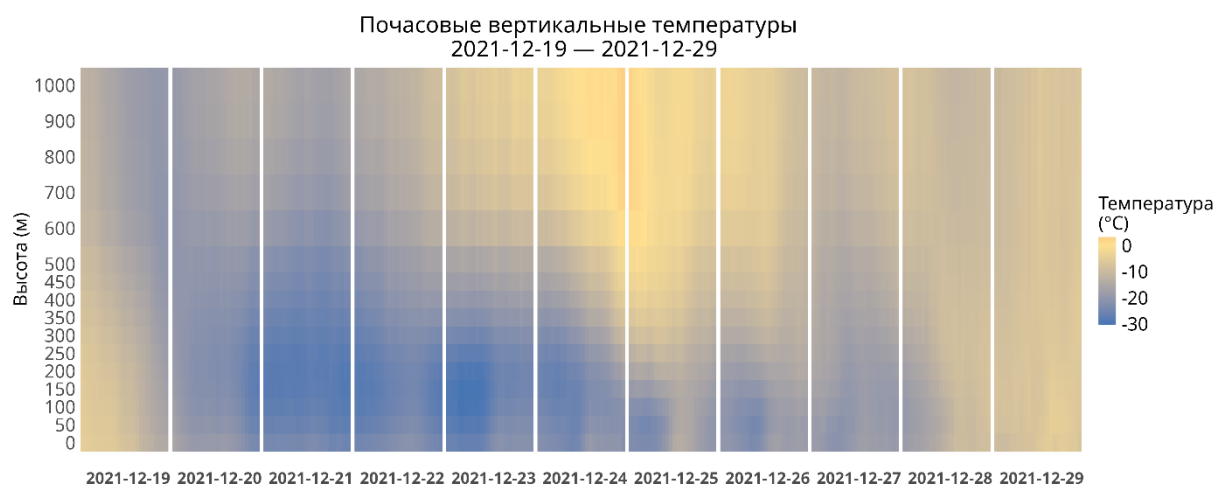
б) в *летний* период. Период включает дни с малыми концентрациями PM2.5 в приземном слое атмосферы

По поведению профилей градиентов температур мы видим, что динамика инверсионного слоя летом в период НМУ существенно отличается от зимнего. Во-первых, запирающий инверсионный слой формируется только в ночные и утренние часы, а днем в верхних слоях атмосферы наблюдаются стандартные отрицательные градиенты. Следует отметить, что модуль дневных градиентов все-таки почти в два раза ниже, чем в фоновый период. Во-вторых, летом инверсионный слой формируется уже в самом нижнем слое атмосферы в весь период НМУ.

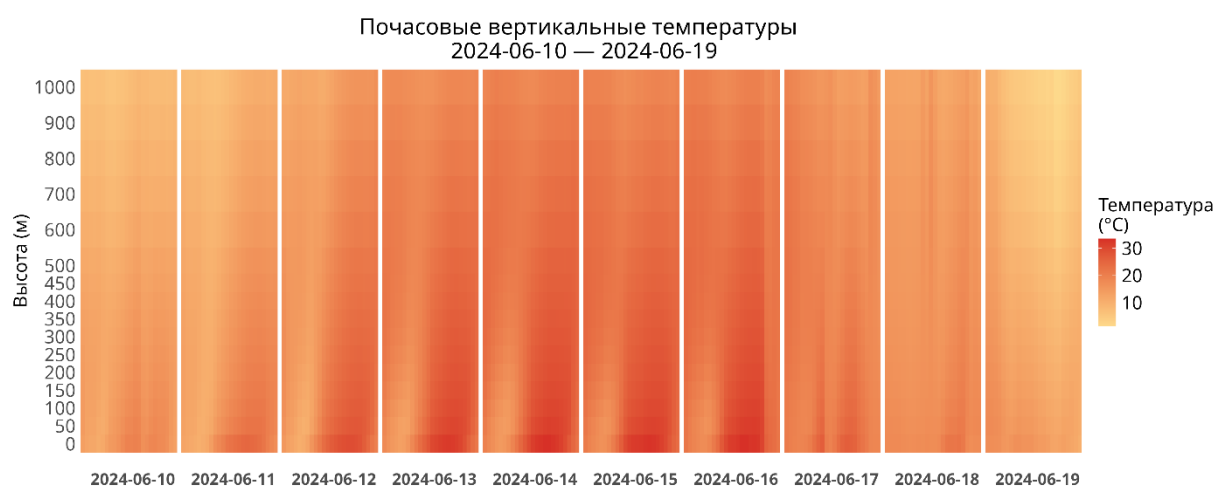
Отметим, что характер температурной инверсии и ее динамика определяют синоптические режимы. Перечислим основные синоптические режимы, которые наблюдаются в г. Красноярске, свяжем с ними характер температурной инверсии.

1. Основной синоптический режим, способствующий накоплению загрязнений в городе – это **антициклон**. Стационарный антициклон – это устойчивая область высокого давления с нисходящими движениями воздуха, которые вызывают его адиабатический прогрев, формируя особо стойкую приподнятую инверсию. Кроме того, ночью радиационное выхолаживание создаёт дополнительную приземную инверсию. Такой режим может сохраняться довольно долго – от 5 до 15 суток, а блокирующий антициклон до месяца. Зимой Красноярск находится на периферии Сибирского максимума, и чаще попадает

скорее в зону гребней и отрогов высокого давления с умеренным нисходящим движением воздуха, формирующим как приподнятую инверсию, так и приземную радиационную с продолжительностью от 2 до 5 суток.



а)



б)

Рис. 3. Тепловая карта профилей температуры:

а) в зимний период, НМУ с 25.12.2021 16:00 по 29.12.2021 19:00;

б) в летний период, НМУ с 13.07.2024 19:00 по 16.07.2024 19:00

2. Непродолжительная (от 12 часов до суток) приподнятая инверсия формируется и в период прохождения **теплого** или **холодного фронтов**. Но из-за непродолжительности этих режимов, а также поскольку при прохождении фронта граница холодной и теплой воздушных масс образуют наклонную плоскость, то накопление загрязнения в этот период менее выражено. Однако, в переходные

сезоны в Красноярске наблюдается формирование стационарного фронта, при котором две воздушные массы находятся в равновесии и не вытесняют друг друга, формируя высокую приподнятую инверсию. Такая ситуация при слабом ветре будет способствовать накоплению загрязнителей в нижнем слое атмосферы.

3. Периоды **теплой** и, особенно, **холодной горизонтальной адвекции** также способствуют формированию не очень длительных, продолжительностью до 2-х суток, приподнятых инверсий. Однако такие периоды сопровождаются усилением ветра, что скорее способствует рассеиванию загрязнителя, чем его накоплению.

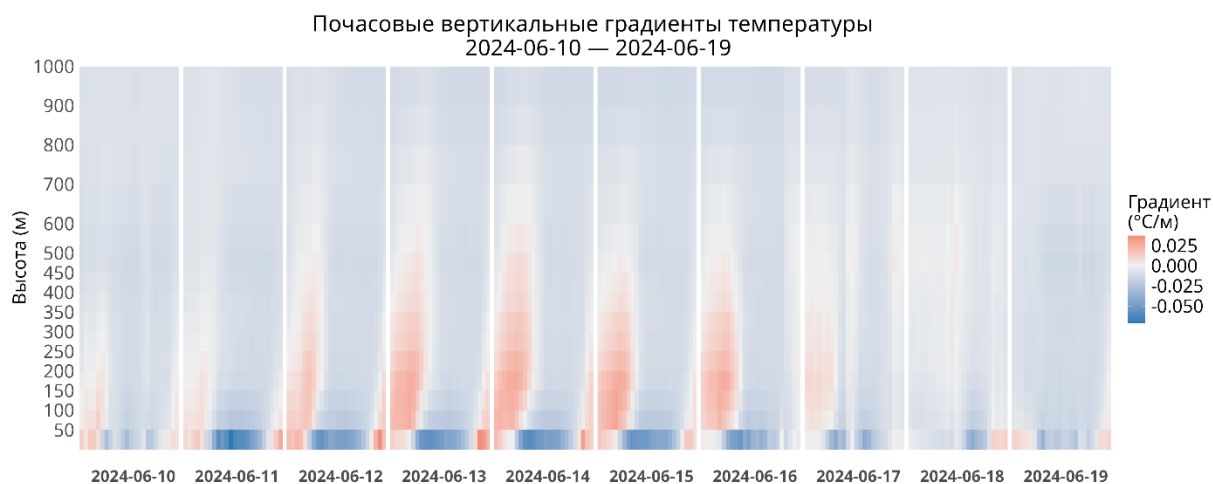
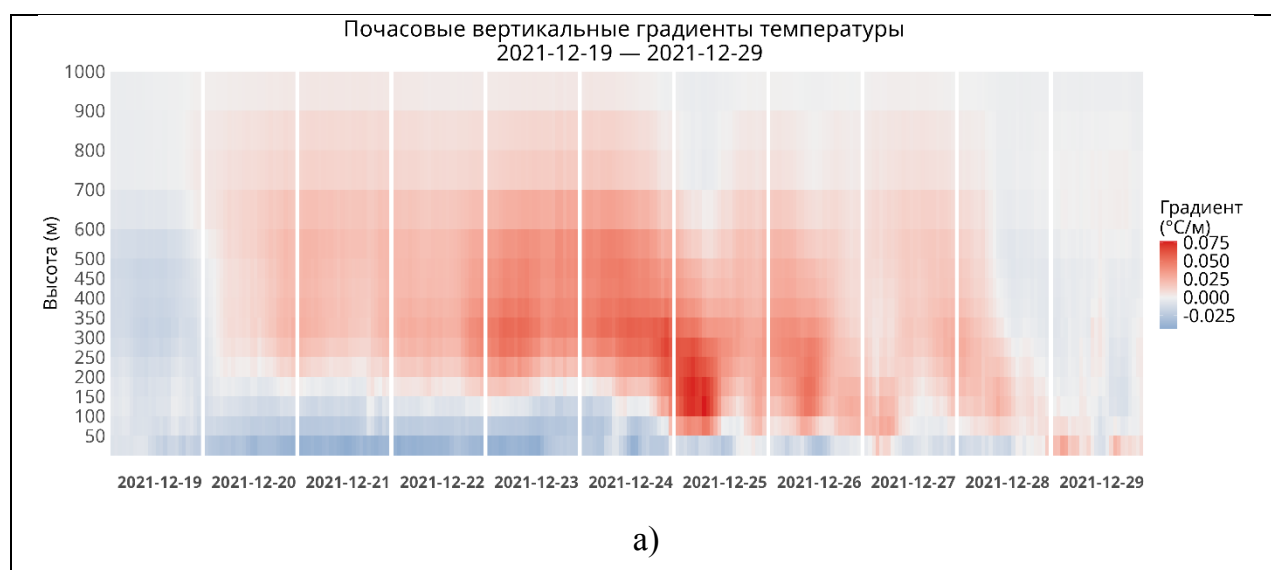


Рис. 4. Тепловая карта профилей градиентов температуры:

а) в зимний период, НМУ с 25.12.2021 16:00 по 29.12.2021 19:00;

б) в летний период, НМУ с 13.07.2024 19:00 по 16.07.2024 19:00

4. В периоды **циклона** (области низкого давления с восходящими движениями воздуха, облачностью и осадками) инверсии редки; возможны лишь на периферии циклона в зонах адвекции или фронтов. При **окклюзии** циклона, когда холодный фронт догоняет тёплый, тёплый воздух зажат между двумя холодными массами; может формироваться сложная многослойная инверсия.

Отметим, что поскольку Красноярск находится в котловине, холодный воздух стекает вниз и застаивается при слабом ветре. Таким образом, орография усиливает приподнятые инверсии приземными, удлиняя их период, что и способствует устойчивому загрязнению атмосферы города.

В заключении отметим, что мы продемонстрировали связь между динамикой вертикальных профилей температуры, синоптическими режимами и периодами повышения концентраций $PM_{2.5}$ в приземном слое атмосферы Красноярска. На основе литературных источников и анализа отдельных эпизодов показано, что синоптический режим может быть описан через совместную динамику вертикальных профилей температуры и данных об основных метеопараметрах в приземном слое атмосферы.

Рассмотрены характерные типы температурных инверсий, формирующиеся в различных синоптических режимах. Показано, что эпизоды высоких уровней концентраций $PM_{2.5}$ часто совпадают с режимами, когда приподнятые и приземные инверсии в сочетании с орографией котловины создают условия для застоя холодного воздуха и накопления загрязнений.

Таким образом, описана основа для построения технологии надёжного предсказания периодов повышения $PM_{2.5}$ в Красноярске на основе следующей идеи: совместный анализ данных о динамике вертикального профиля градиента температур и данных от наземных метеостанций даст возможность определить синоптический режим, а знание синоптического режима совместно с данными о динамике $PM_{2.5}$ даст возможность надёжного прогноза развития ситуации с $PM_{2.5}$ в приземном слое атмосферы города.

Список литературы

1. Метеорологический температурный профилемер МТП-5 [Электронный ресурс] –Портал НПО АТТЕХ – Режим доступа: <http://attex.net/RU/mtp5.php> (дата обращения: 15.09.2026).
2. Малимонов М.И. Визуализация и анализ данных метеорологического температурного профилемера / Малимонов М.И., Якубайлик О.Э. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. – Т. 31(3). – С. 41-49.
2. Li X. Long-Term Air Pollution Characteristics and Multi-scale Meteorological Factor Variability Analysis of Mega-mountain Cities in the Chengdu-Chongqing Economic Circle / Li X, Abdullah LC, Sobri S, Md Said MS, Hussain SA, Aun TP, Hu J. // Water Air Soil Pollut. – 2023. – V. 234(5). – Article 328.
3. AlQahtani A.I. Air quality levels in the industrial city of Jubail, Saudi Arabia / AlQahtani A.I., Salama K.F., Alwadei M.M., Aljassim M.T., Alsaif A.S., Al-Warthan M. and AlMulla A.A. // Frontiers in Environmental Engineering. – 2024. – V. 3. – Article 1483568.
4. Karepova E. Temporal patterns of instrumentation failures in atmospheric boundary layer observational systems / E. Karepova, Y. Shan'ko, A. Tokarev, V. Petrakova. // E3S Web of Conferences. – 2025. – V. 646. – Article 00011.

СОЗДАНИЕ АРХИВА КОНЦЕНТРАЦИЙ МГС ДЛЯ КРАСНОЯРСКА И ОКРЕСТНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

К.В.Краснощеков¹, В.Ю.Ромасько¹, А.В.Дергунов¹

¹ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук», krasko@icm.krasn.ru

Для задачи оценки качества воздуха в Красноярске был создан архив спутниковых данных с прибора TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), установленного на спутнике Sentinel 5. Данный архив содержит информацию о концентрациях малых газовых состояний (МГС) на территорию Красноярска и окрестных территорий за период с 2019 по 2025 годы. В отличие от стационарных постов наблюдения, предоставляющих информацию о концентрации МГС в точке, в которой они установлены, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предоставляют пространственную информацию на всю территорию Земли.

Прибор TROPOMI, это спектрометр, измеряющий отраженный свет от поверхности Земли в диапазонах длин волн от ультрафиолетового до коротковолнового ИК диапазона спектра, что позволяет разрабатывать продукты, содержащие информацию о концентрации различных МГС. Орбита спутника, на котором установлен данный прибор позволяет получать ежедневные данные с пространственным разрешением 3,5X5,5 км [1].

Исходные данные по продуктам Sentinel 5p загружаются из портала Sentinel-5P Product Algorithm Laboratory (S5P-PAL).

Для оценки качества воздуха в Красноярске были выбраны продукты, содержащую информацию о концентрации МГС, перечисленных в таблице 1.

Таблица 1.

Аэрозоль	Форма записи	Пр. разр-ие (км/пикс)	Единицы измерения
Метан	CH ₄	4,8 на 2,6	mol/m ²
Оксид углерода	CO	4,8 на 2,6	mol/m ²
Формальдегид	HCHO	2,4 на 1,3	mol/m ²
диоксид азота	NO ₂	2,4 на 1,3	mol/m ²

озон	O ₃	2,4 на 1,3	mol/m ²
диоксид серы	SO ₂	2,4 на 1,3	mol/m ²
общее содержание водяного пара	TCWV	2,4 на 1,3	kg/m ²

Файлы данных продуктов имеют расширение «.nc» и содержат ежесуточные концентрации на территорию всей планеты. Файл содержит в себе информацию о концентрации аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы, для канала под номером 1 (column_density). Второй канал содержит ошибку измерения для каждой точкой измерения (column_density_uncertainty). Третий канал указывает на количество суточных измерений для каждого пикселя данных. Один файл продукта может весить до 900 мб. Для наполнения архива исходными данными был написан сервис на языке программирования C++, который скачивает и хранит всю информацию, которую выкладывают на данный ресурс. На данный момент архив занимает 15 тб памяти и содержит 110 папок и 43 тысячи файлов. Данные доступны начиная с мая 2018 года по настоящее время

Основная цель работы - это оценить качество воздуха над территорией Красноярска и окрестных территорий. Следовательно исходные данные продуктов, предоставляющих концентрации МГС на территорию всей земли являются избыточными. С архива с первичной информацией мы брали данные о концентрации малых газовых составляющих и ограничивали набор данных территорией вблизи Красноярска. Скачивались данные, которые содержат только полный календарный год, с 2019 по 2025 годы. По итогу для каждого аэрозоля за выбранный период времени обрабатывалось 2648 файлов, которые содержат суточные, среднемесячные и среднегодовые значения.

В целях оптимизации дискового пространства и удобства использования первичные файлы обрабатывались следующим образом. Данные из формата «.nc» были переконвертированы в формат tiff, как наиболее универсальный формат данных, с сохранением географической привязки. Так же полученные файлы были обрезаны по границе области интереса, ограниченной квадратом шейп-файла., размером 1000 на 1000 километров с центром в Красноярске. Все

приведенные выше манипуляции выполнялись с использованием скрипта написанного на языке программирования Python. При написании кода использовались библиотеки Numpy и Gdal.

Алгоритм работы программы выглядит следующим образом. В каталог, содержащий исходные данные в формате «.nc» копируется скрипт на питоне и shape файл, по которому будет определяться территория области интереса. После запуска приложения будет просканирован первый файл, и программа выдаст список каналов, которые содержатся в файле и спросит какие из них нам необходимо сохранить. Так как все файлы содержат одну и ту же структуру данных, номера каналов будут совпадать для всех файлов. Далее каждый файл будет преобразовываться в формат «.tiff» обрезаться по координатам, полученным из shape файла и после того, как новый файл будет создан без ошибок, исходный файл из рабочего каталога удаляется, для освобождения места на диске.

После выполнения конвертации данных, общий объем архива данных с 2019 по 2025 годы, содержащего информацию о концентрации семи МГС, приведенных в таблице 1 составляет 45 гб.

Для анализа концентраций МГС необходимо знать основные его источники, как естественные, так и антропогенные, а также их влияние на атмосферные процессы. Краткая информация для МГС, содержащихся в архиве предоставлена в таблице 2 [2].

Таблица 2.

Аэрозо ль	Основные источники		Вызываемые атмосферные процессы
	Природные	Антропогенные	
CH ₄	Водно-болотные угодья, океаны, таяние вечной мерзлоты.	Сельское хозяйство, добыча и использование ископаемого топлива.	Мощный парниковый газ. Химически активен: окисляется радикалом ОН, что снижает окислительную способность атмосферы и удлиняет время жизни других примесей

CO	Вулканизм, Окисление метана.	Неполное сжигание топлива (автотранспорт, промышленность, бытовые печи).	Способствует усилению смоговых ситуаций
CH ₂ O	Фотохимичес кие реакции (окисление метана и других углеводородо в).	Химическая промышленность, производство смол.	Активный участник фотохимического смога; ускоряет окисление NO до NO ₂ и образование озона. В высоких концентрациях формальдегид оказывает прямое токсичное и канцерогенное действие.
NO ₂	Вулканизм, грозы, почвенные микроорганиз мы.	Автомобильный транспорт, промышленные предприятия.	Запускает фотохимический цикл образования озона. В городе способствует возникновению фотохимического смога.
O ₃	Фотохимичес кие реакции оксидов азота и летучих органических соединений.	Фотохимические реакции с участием выбросов транспорта и промышленности	Высокий приземной озон вызывает фотохимический смог, угнетает растительность, является сильным окислителем, ухудшающим здоровье дыхательных путей
SO ₂	Извержения вулканов, почвенные микроорганиз мы.	Сжигание топлива, металлургические производства.	SO ₂ быстро окисляется в атмосфере до серной кислоты (H ₂ SO ₄), образуя сульфатные аэрозоли. Это вызывает кислотные дожди, закисление почв и водоёмов

TCWV	Испарение с водных объектов и почв.	Сжигание топлива, орошение зелёных насаждений, промышленные процессы	Главный парниковый газ. Увеличение его содержания в городе усиливает нисходящий длинноволновой поток, влияя на городской тепловой остров.
------	-------------------------------------	--	---

Проанализировав таблицу 2, можно увидеть, что для Красноярска характерны как природные, так и антропогенные источники для всех из приведенных МГС. Основным же негативным влиянием при повышенных концентрациях является увеличению количества смога.

Полученный архив позволяет увидеть повышенные концентрации МГС, а также оценить его динамику.

Для примера была рассмотрена среднемесячная концентрация угарного газа (CO) за февраль 2025 года (рисунок 1).

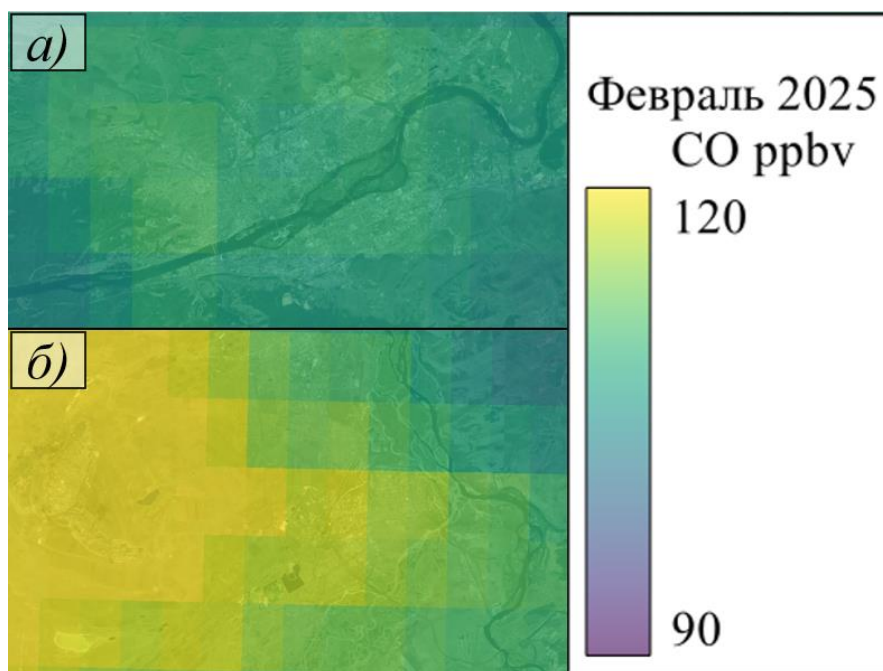


Рис. 1. Среднемесячная концентрация CO за февраль 2025г. для Красноярска (а) и для Абакана (б).

Концентрации для двух городов отображены в единой шкале измерений. Концентрации даны в ppbv (parts per billion by volume), что означает «частей на миллиард по объему», в нашем случае высота равняется вертикальному столбу атмосферы, а длина и ширина равняется пространственному разрешению

Для оценки динамики концентраций МГС необходимо определиться с областью интересов, при необходимости получить среднее значение для данной области и определиться с интересующим периодом наблюдений. Для примера был построен график средних значений угарного газа в каждом месяце в период с 2019 по 2025 год для Красноярска.

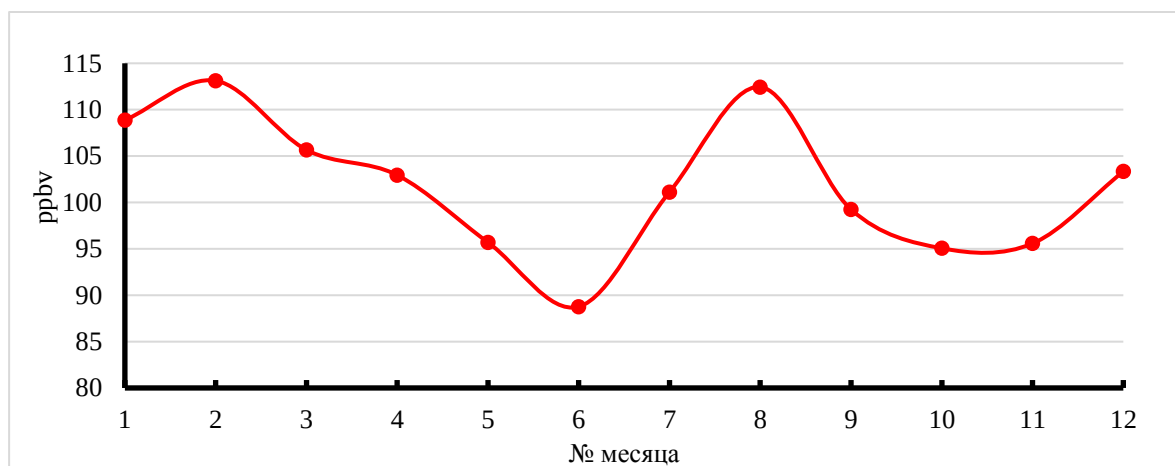


Рис. 2. Средние концентрации угарного газа в каждом месяце в период с 2019 по 2025гг.

На рисунке 2 можно заметить, что концентрации угарного газа в Красноярске имеют сезонную динамику с зимним и летним пиком. Зимний пик может быть связан с отопительным периодом, а летний с дымовыми шлейфами от лесных пожаров, которые простираются до территории города.

Полученный архив позволит больше узнать о концентрациях МГС в атмосфере города Красноярска и его окрестностей. Это может способствовать пониманию атмосферных процессов, определению источника повышенных концентраций, а также его типа, например, естественного или антропогенного.

Список литературы

1. de Graaf M., de Haan J. F., Sanders A. F. J. TROPOMI ATBD of the aerosol layer height, issue 2.4. 0 //Retrieved from sentinels. copernicus. eu. – 2022.
2. Морзак Г. И., Хрипович А. А. Физико-химические процессы в окружающей среде. Минск : БНТУ, 2016.

ВЕБ-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ АТМОСФЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДАННЫХ МОНИТОРИНГА КРАСНОЯРСКА

М.И.Малимонов¹, А.А.Пушкарев¹

ФИЦ КНЦ СО РАН, *mmalimonov@ksc.krasn.ru*

Введение. Анализ атмосферных данных предполагает изучение пространственных неоднородностей и изменений показателей во времени. Табличное представление сохраняет численные значения, но затрудняет выявление структуры многомерного поля и сравнение длительных рядов. Интерактивная визуализация позволяет выбирать интересующие области, высоты и периоды, переходя от общего обзора к подробному рассмотрению данных. Связь методов отображения с задачами метеорологического анализа систематизирована в обзоре [1]. В работе [2] рассмотрено трёхмерное отображение загрязняющих веществ средствами WebGL, а в системе PolarGlobe [3] — сочетание объёмного представления, фильтров и вертикальных профилей модельных полей.

В статье рассматриваются способы отображения результатов WRF-Chem и наблюдений постов мониторинга Красноярска. Модельные данные включают поля концентраций примесей и ветра [4], наблюдения — измерения в отдельных точках территории. Цель работы состоит в организации взаимодополняющих картографических и графических представлений для исследования этих данных. Особое внимание уделяется выбору цветовых шкал, вертикальному отображению полей и сравнению временных рядов.

Картографическое представление скалярных полей. Для концентраций и других скалярных величин предусмотрены горизонтальные срезы и объёмные ячейки. Пространственный контекст обеспечивает карта MapLibre GL JS, отображение массивов выполняется средствами deck.gl [5]. Пользователь выбирает показатель, расчётный срок и уровень. Изменение способа отображения выполняется на основе загруженных числовых значений, что позволяет исследовать одно поле в нескольких представлениях.

Горизонтальный срез формируется преобразованием значений выбранного уровня в растровое изображение. Каждому значению соответствует цвет непрерывной палитры Turbo. Легенда показывает числовые границы

диапазона, а настройка прозрачности позволяет сохранять видимость картографической подложки. Такое представление удобно для изучения распределения концентрации на одной высоте и сравнения последовательных расчётных сроков. На рисунке 1 показан пример горизонтального среза. Неравномерность восприятия цветовых переходов может искажать оценку различий [6], поэтому палитра Turbo используется вместе с численной легендой и не заменяет сравнения самих значений.

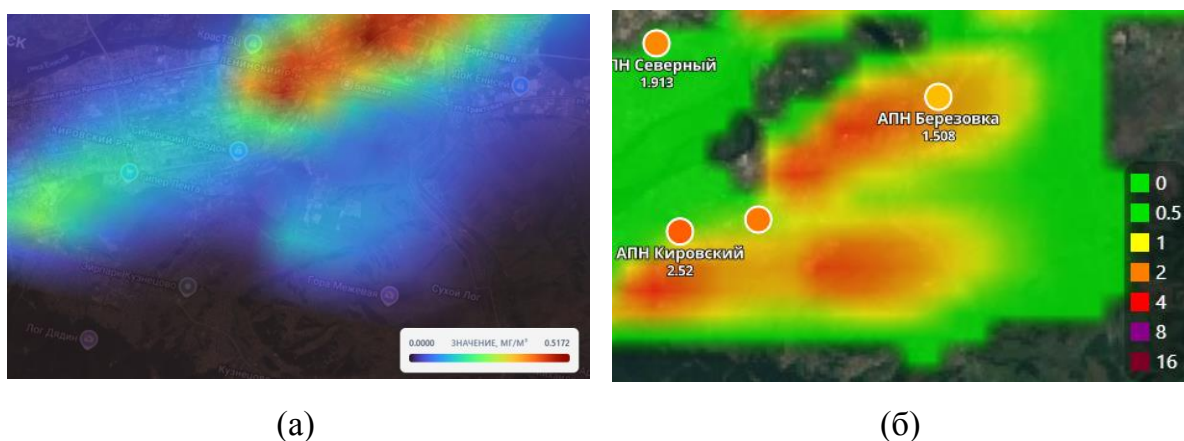


Рис. 1. Горизонтальный срез. Отображение с плавным градиентом (а) и отображение с заданными классами (б).

Изменение границ цветовой шкалы одновременно задаёт фильтр отображаемых значений. Ячейки вне выбранного интервала становятся прозрачными, как и элементы с отсутствующими или некорректными данными. На рисунке 2 показаны отфильтрованные ячейки.

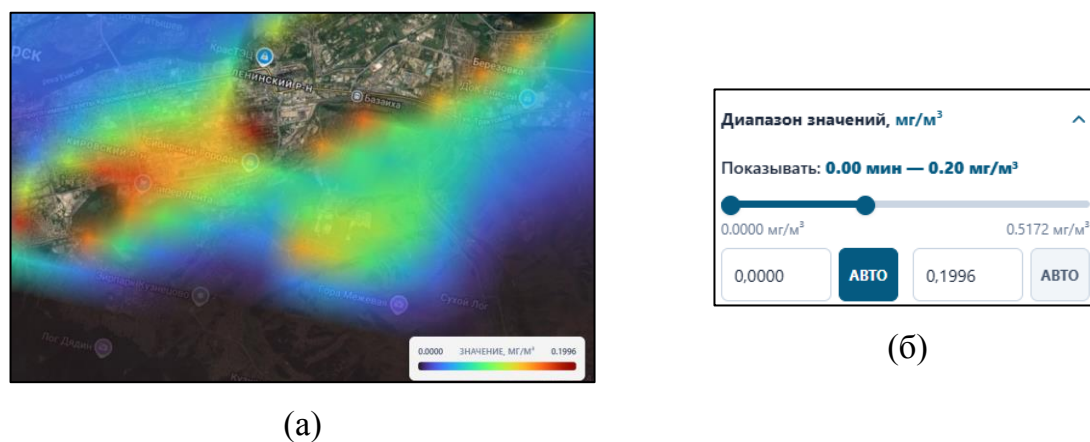


Рис. 2. Отображение прозрачных ячеек (а) при изменении диапазона значений (б)

Это позволяет выделять области интересующего диапазона. При интерпретации изображения необходимо различать отсутствие данных и результат фильтрации: прозрачная область сама по себе не означает нулевого значения показателя.

Объёмное представление строится из пространственных ячеек. Их положение определяется модельной сеткой, высота геометрического элемента — толщиной слоя, цвет — значением величины. Настройки плотности и прозрачности позволяют уменьшать взаимное перекрытие элементов. Пользователь может рассматривать совокупность уровней либо переходить к одному слою, уточняя особенности, выявленные на общем изображении. На рисунке 3 отображены объёмные данные.

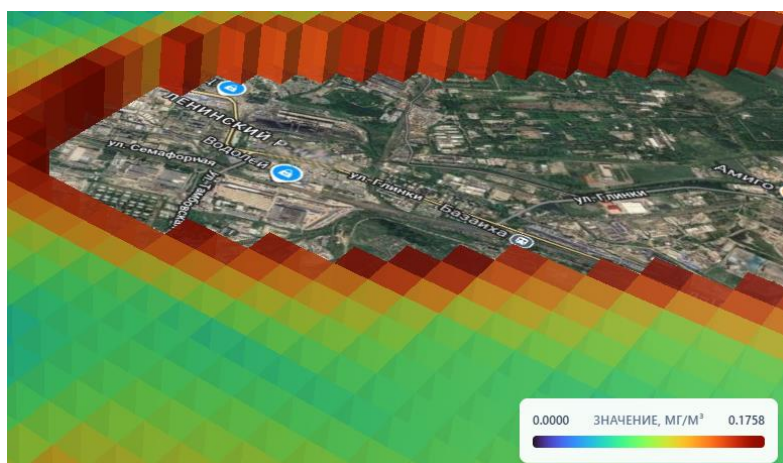


Рис. 3. Отображение объёмных данных.

Выбор между плоским и объёмным режимами определяется задачей анализа. Горизонтальный срез удобен для сравнения участков территории без перекрытия слоёв. Объёмное изображение позволяет сопоставить распределение величины на нескольких высотах, однако видимость внутренних ячеек зависит от ракурса и прозрачности. Поэтому обнаруженную в объёме особенность целесообразно рассмотреть на отдельном уровне, где её положение и цветовое значение читаются однозначнее. Сочетание двумерных и трёхмерных представлений атмосферных полей применяется также в Met.3D [7].

Вертикальное положение зависит от доступных сведений о высотах. Подготовленные данные могут содержать границы уровней, вычисленные по геопотенциалу и усреднённые по расчётной области. При отсутствии этих

сведений используется задаваемое пользователем регулярное размещение слоёв. В первом случае изображение передаёт усреднённую вертикальную структуру, во втором – высотная шкала условна. Картографический рельеф служит пространственным ориентиром и не устраняет эти ограничения.

Визуализация ветра. Для ветрового поля используются стрелки и линии тока. Стрелки показывают направление скорости в выбранных узлах; их масштаб регулируется пользователем. Цвет определяется модулем скорости по компонентам U , V и W . Векторное представление позволяет рассматривать локальные различия направления и величины ветра, сохраняя связь графических элементов с положением узлов поля (рисунок 4).

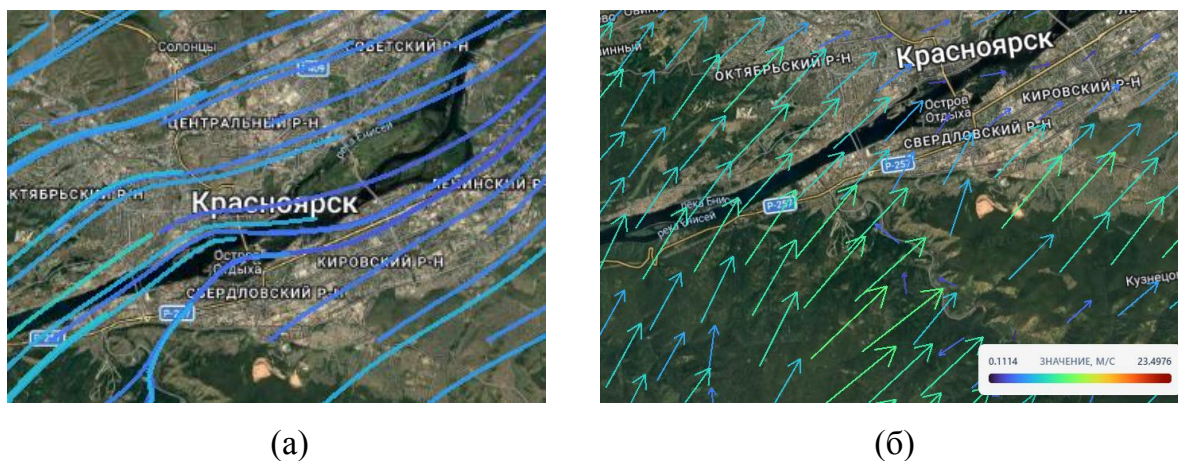


Рис. 4. Отображение векторов ветра. В виде линий (а) и в виде векторов (б).

Линии тока строятся последовательным перемещением по горизонтальному полю U и V . Между узлами компоненты вычисляются билинейной интерполяцией. Направление шага соответствует горизонтальному вектору скорости, а цвет линии характеризует средний модуль скорости вдоль построенного участка. Трассирование ограничивается границами поля, наличием корректных значений, величиной горизонтальной скорости и заданным числом точек.

Каждая линия располагается на фиксированном модельном уровне. Вертикальная компонента участвует в вычислении модуля скорости, но не изменяет высоту линии. Поэтому изображение характеризует горизонтальную структуру ветра на выбранный срок и не является траекторией частицы в изменяющейся атмосфере. Различие линий тока и траекторий существенно для

интерпретации нестационарного поля [8]. Для обзорного просмотра используется ограниченный набор уровней и регулируемая плотность начальных точек. Подробное рассмотрение выполняется после выбора отдельного уровня.

Отображение наблюдений. Посты мониторинга представлены маркерами на карте. Цвет маркера соответствует значению выбранного показателя и его палитре классов. Карта позволяет находить различия между станциями и выбирать посты для подробного анализа. На рисунке 5 показан пример отображения данных с постов мониторинга.

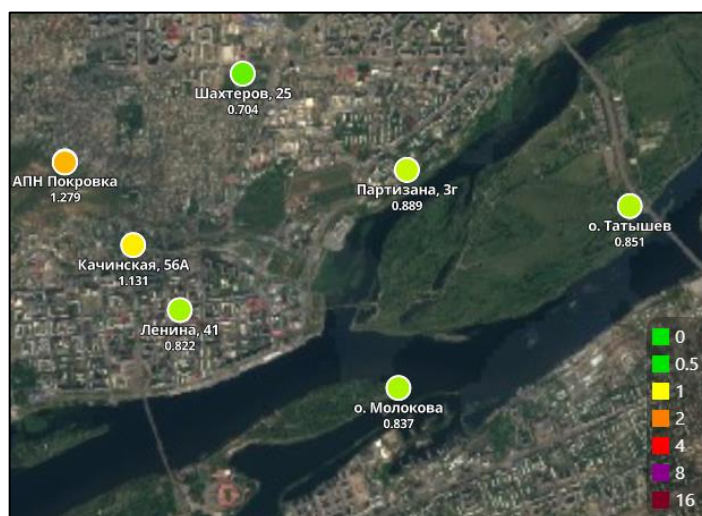


Рис. 5. Отображение маркеров на карте. В нижнем правом углу находится легенда с палитрой классов.

Измерения сохраняют точечное представление: приложение не подменяет сеть наблюдений интерполированным сплошным полем.

Цветовое обозначение применяется и на временной шкале. Каждая отметка отражает среднее значение показателя по постам за соответствующий интервал. Для периода менее пяти дней используются часовые отметки, для пяти дней и более — суточные. При наведении выводится численное значение. Карта характеризует различия между станциями, а шкала помогает выделять интервалы изменения показателя. На рисунке 6 продемонстрирована временная шкала с различными настройками.



Рис. 6. Временная шкала. Видны настройки для выбора отображаемого показателя, календарь для выбора промежутка, и метки со средними значениями.

Выбор поста открывает графики наблюдений, построенные средствами Apache ECharts. Пользователь задаёт период и добавляет показатели, например PM2.5 и температуру воздуха. Для разных единиц измерения используются отдельные оси. Это позволяет сопоставлять время максимумов и характер изменения величин, сохраняя их численные масштабы. Графики нескольких станций можно просматривать отдельно либо усреднять одинаковый показатель по выбранной группе (рисунок 7).

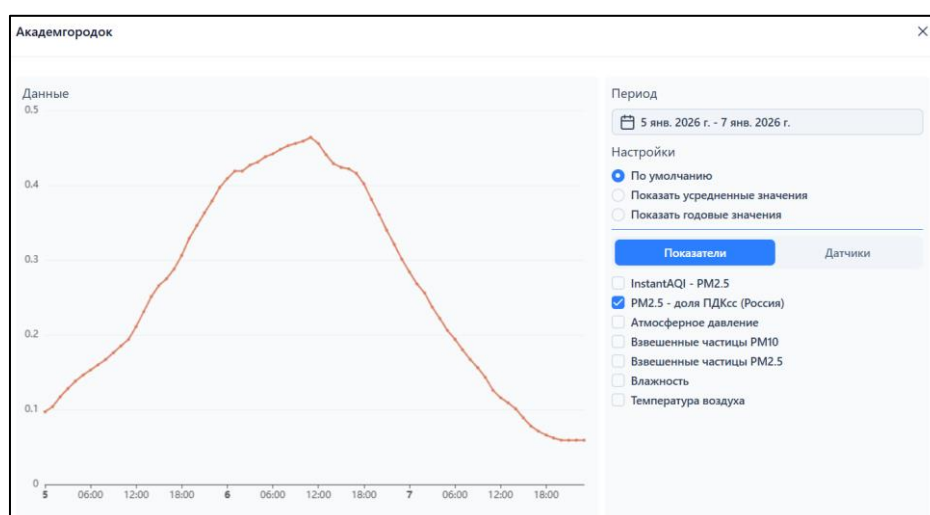


Рис. 7. Отображение данных с поста мониторинга.

Дополнительный режим позволяет сравнивать месячную динамику за разные годы. Он предназначен для рассмотрения повторяемости особенностей внутри одного сезонного периода. При работе с длительными рядами пользователь сначала выделяет интересующий участок на обзорной шкале, затем уточняет его на подробном графике. Такой переход особенно важен для кратковременных изменений, которые могут сглаживаться при посуточном осреднении.

Раздельное отображение станций и усреднение отвечают разным

вопросам. Несколько рядов позволяют видеть, одновременно ли происходят изменения на выбранных постах и насколько различается их выраженность. Усреднённый график сокращает число кривых и облегчает рассмотрение общей динамики группы, но сглаживает различия между станциями. Переключение этих режимов позволяет сохранять обзорность графика и обращаться к отдельным измерительным пунктам при необходимости.

Отображение данных температурного профилемера.

Через специальное меню пользователь может посмотреть данные температурного профилемера. Доступны три графика: профиль, термограммы и температурная инверсия.

Профиль отображает данные за конкретный выбранный момент времени. Момент времени выбирается при нажатии левой кнопкой мыши по термограммам или по температурным инверсиям. На профиле выделяются температурные инверсии. Синим цветом, если температурная инверсия ниже 0.5 градуса, красным – выше 0.5 градуса.

Термограммы показывают данные температурного профилемера по высотам. Каждый отдельный линейный график – высота, на который были получены измерения.

График «Температурные инверсии» отображают температурные инверсии по высотам в формате Heatmap. Линейный график показывает сумму температурных инверсий.

При наведении на график появляются окна с дополнительной информацией. Для каждого графика написано свое окно, которое отображает уникальную информацию. При наведении на профиль отображается высота и температура на этой высоте. При наведении на термограммы отображаются данные температуры на каждой высоте с цветовой палитрой. При наведении на температурные инверсии отображается информация на какой высоте наблюдается температурная инверсия и сумма.

Сценарии визуального анализа. Особенности горизонтального среза уточняются на других уровнях и в объёмном представлении. При последовательном просмотре концентрации и ветра необходимо учитывать фактический срок каждого кадра.

По карте и временной шкале выбираются станции и интервалы для сравнения подробных рядов. Среднее по постам характеризует выбранные измерения, а не всю площадь города; состав станций и пропуски следует учитывать при интерпретации.

При сравнении изображений одного показателя необходимо сохранять одинаковые границы цветовой шкалы. Иначе изменение окраски может быть вызвано настройками, а не различием значений. Для сравнения высот существенен способ задания модельных уровней, для сопоставления с наблюдениями — единицы измерения и временное осреднение. Визуально обнаруженное совпадение изменений служит основанием для количественной проверки, но само по себе не устанавливает причинной связи.

Заключение. Рассмотренные средства обеспечивают переход от пространственного и временного обзора к детальному исследованию атмосферных данных. Горизонтальные срезы и объёмные ячейки раскрывают структуру скалярных полей, стрелки и линии тока характеризуют ветер. Карта постов, временная шкала и графики позволяют сравнивать наблюдения. Согласованное использование этих представлений помогает выделять особенности распределения и динамики показателей, выбирать данные и формулировать задачи количественного анализа.

Список литературы

1. Rautenhaus M., Böttinger M., Siemen S. et al. Visualization in Meteorology—A Survey of Techniques and Tools for Data Analysis Tasks // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. — 2018. — Vol. 24, No. 12. — P. 3268–3296. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2779501.
2. Liu D., Peng J., Wang Y. et al. Implementation of interactive three-dimensional visualization of air pollutants using WebGL // Environmental Modelling & Software. — 2019. — Vol. 114. — P. 188–194. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.01.019.

3. Wang S., Li W., Wang F. Web-Scale Multidimensional Visualization of Big Spatial Data to Support Earth Sciences—A Case Study with Visualizing Climate Simulation Data // Informatics. — 2017. — Vol. 4, No. 3. — Art. 17. DOI: 10.3390/informatics4030017.
4. Grell G.A., Peckham S.E., Schmitz R. et al. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model // Atmospheric Environment. — 2005. — Vol. 39, No. 37. — P. 6957–6975. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.
5. Wang Y. Deck.gl: Large-scale Web-based Visual Analytics Made Easy // IEEE Workshop on Visualization in Practice. — 2017. — Препринт: arXiv:1910.08865, 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1910.08865>.
6. Crameri F., Shephard G.E., Heron P.J. The misuse of colour in science communication // Nature Communications. — 2020. — Vol. 11. — Art. 5444. DOI: 10.1038/s41467-020-19160-7.
7. Rautenhaus M., Kern M., Schäfler A., Westermann R. Three-dimensional visualization of ensemble weather forecasts – Part 1: The visualization tool Met.3D (version 1.0) // Geoscientific Model Development. — 2015. — Vol. 8. — P. 2329–2353. DOI: 10.5194/gmd-8-2329-2015.
8. McLoughlin T., Laramée R.S., Peikert R., Post F.H., Chen M. Over Two Decades of Integration-Based, Geometric Flow Visualization // Computer Graphics Forum. — 2010. — Vol. 29, No. 6. — P. 1807–1829. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2010.01650.x.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ С МОДЕЛЬНЫМИ И НАБЛЮДАЕМЫМИ ДАННЫМИ АТМОСФЕРЫ КРАСНОЯРСКА

М.И.Малимонов¹, А.А.Пушкарев¹

ФИЦ КНЦ СО РАН, *malimonov.mi@ksc.krasn.ru*

Введение. Исследование состояния атмосферного воздуха требует использования результатов численного моделирования, измерений концентраций загрязняющих веществ и метеорологических наблюдений. Расчётные поля описывают распределение величин на пространственной сетке, тогда как наблюдения связаны с отдельными постами. Различия в структуре, временном разрешении и способах хранения этих данных затрудняют их использование в общем исследовательском процессе. Согласование разнородных источников рассматривается в исследованиях интегрированного экологического моделирования [1], а способы организации веб-доступа к большим экологическим массивам — в обзоре [2].

В работе представлены два веб-приложения для анализа атмосферных данных Красноярска. Первое обеспечивает доступ к результатам WRF-Chem, второе — к данным постов мониторинга. Цель работы состоит в организации подготовки, поиска и загрузки данных с сохранением их пространственных и временных характеристик. Рассматриваются архитектура приложений, принципы хранения расчётных массивов и обработка рядов наблюдений.

Подготовка модельных данных. WRF-Chem объединяет расчёт метеорологических и химических процессов на согласованной сетке [3]. Использованный набор для Красноярска охватывает период с 20 по 24 января 2023 г. и включает 577 временных состояний с шагом 10 мин. Основная сетка содержит 84×96 ячеек с горизонтальным шагом 1 км и 32 вертикальных уровня. Представлены концентрации примесей, компоненты ветра и вспомогательные атмосферные величины. Устройство модельной системы WRF описано в работе [4].

Данные, извлечённые из исходного NetCDF [5], организованы в виде файлов GeoTIFF по переменным и расчётным моментам. Формат сохраняет

растровые значения вместе с географической привязкой. Каналы файла соответствуют вертикальным уровням одной переменной. Такая организация позволяет загружать отдельное временное состояние, не обращаясь ко всему многосуточному массиву. Сведения о доступных файлах хранятся отдельно от числовых данных. Связь многомерных массивов с именованными координатами рассматривается также в работе об хаггау [6]; при преобразовании форматов необходимо сохранять соответствие значений времени и уровням.

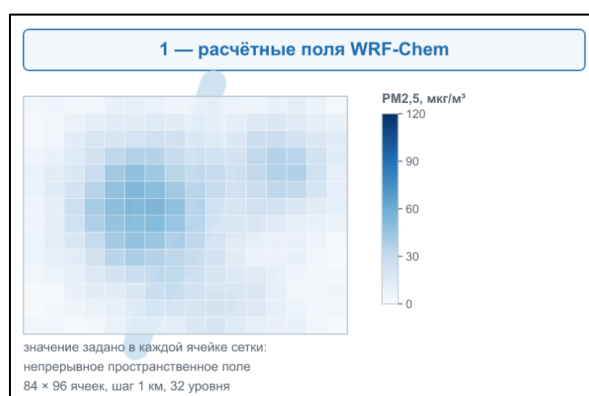


Рис. 1. Расчётные поля WRF-Chem.

Для передачи многокомпонентных полей используется внутренний бинарный формат GTB1. Его заголовок содержит размерности сетки, пространственные границы, описание компонент и высоты уровней, если они определены. За заголовком располагается массив чисел с плавающей точкой. Компоненты ветра U , V и W объединяются в один файл, что обеспечивает их согласованную загрузку для выбранного срока.

При подготовке ветра учитывается расположение компонент на сдвинутых сетках WRF. Они приводятся к основной сетке усреднением соседних элементов вдоль соответствующего направления. Высоты границ слоёв вычисляются по сумме базового и возмущённого геопотенциала и усредняются по горизонтальной области. Это описание сохраняет общую вертикальную структуру, но не локальное изменение высот над рельефом. Географическая привязка файлов должна соответствовать координатам, используемым картографическим приложением.

Архитектура доступа к расчётам. Файловое хранилище содержит модельные поля, а база SQLite выполняет функцию каталога. Каждая запись включает имя набора, относительный путь, начало и окончание временного интервала и формат файла. При запуске приложение загружает каталог по HTTP и читает его в памяти браузера с помощью sql.js. Из записей формируются перечень показателей и временная шкала.

Разделение каталога и массивов позволяет определить состав данных до загрузки выбранного поля. Для добавления кадров существующего типа достаточно разместить подготовленные файлы и обновить индекс. Серверный запрос к базе при каждом изменении времени не требуется: нужная запись определяется на клиенте. При этом обновление хранилища и каталога является отдельной операцией, не связанной с действиями пользователя в интерфейсе. На рисунке 2 показана схема формирования данных для отображения в браузере.



Рис. 2. Выбор срока отображения данных и процесс формирования данных для отображения в браузере.

Каталог связывает логическое обозначение набора с конкретным ресурсом хранилища. Записи группируются по показателям и сортируются по времени; для каждой группы определяются доступные сроки и границы последовательности. Это позволяет использовать один механизм поиска для переменных с различным составом кадров. При смене показателя временная шкала перестраивается по его записям, сохраняя выбранное пользователем положение настолько, насколько это допускают доступные данные. Значимость описательных метаданных для поиска и повторного использования научных данных отражена в принципах FAIR [7].

После выбора показателя и срока загружается соответствующий файл.

GeoTIFF обрабатывается библиотекой `geotiff.js`, GTB1 — специализированным модулем чтения. Оба формата приводятся к общей структуре, содержащей размерности, пространственную привязку, уровни и числовой массив. Благодаря этому загрузка данных отделена от построения графических слоёв. Клиент реализован на TypeScript; картографическое представление обеспечивают MapLibre GL JS и `deck.gl`.

Временная навигация поддерживает выбор срока, пошаговое перемещение и воспроизведение последовательности. Если точный кадр отсутствует, рассматриваются интервальные и предыдущие записи. Пользователю показывается время фактически загруженного поля. Пропущенные значения при этом не вычисляются: механизм предоставляет существующие данные, поэтому при сопоставлении с наблюдениями необходимо учитывать действительный срок расчёта.



Рис. 3. Данные постов мониторинга.

Загрузка выполняется асинхронно. Идентификатор запроса позволяет исключить подмену выбранного состояния ответом на устаревшее действие пользователя. При чтении каталога проверяются обязательные поля и временные записи, при разборе GTB1 — версия формата и достаточность числового массива. Эти проверки обеспечивают структурную согласованность передаваемых данных. Оценка физической достоверности расчёта требует самостоятельного сопоставления с измерениями.

Организация работы с наблюдениями. Данные мониторинга представлены измерениями, связанными с идентификатором станции, временем и показателем. Аналогичные связи наблюдения с местом, временем и описанием

величины лежат в основе модели экологических наблюдений ODM [8]. Приложение поддерживает концентрации загрязняющих веществ, включая PM2.5 и PM10, и метеорологические характеристики. Запрос определяется выбранными постами и периодом. В отличие от модельного кадра, полученный набор представляет временные ряды в фиксированных точках, а не сплошное пространственное поле. На рисунке 3 продемонстрирован пример отображения данных с постов мониторинга на карте.

Клиентская часть приложения построена на Vue и разделена на управление данными, обработку и компоненты интерфейса. Первый слой получает сведения от сервера и подготавливает исходные объекты. Второй группирует измерения по станциям и временным интервалам, формирует ряды и связывает их с настройками просмотра. Компоненты отвечают за карту, календарь, выбор показателей и графики. Такая структура отделяет получение измерений от их представления (рисунок 4).

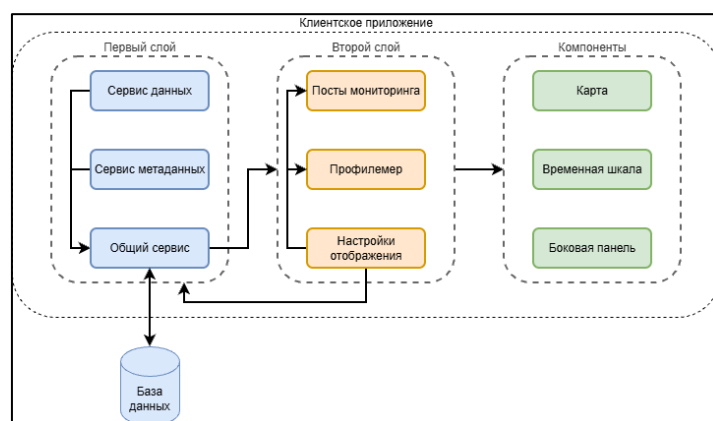


Рис. 4. Устройство слоев в клиентской части.

Обработка наблюдений определяется исследовательским запросом. При выборе нескольких постов сохраняется принадлежность значений каждой станции, а при усреднении формируется обобщённый ряд одинакового показателя. Отдельный календарь в окне поста позволяет изменять период подробного просмотра. Поэтому параметры общего обзора и анализа конкретной станции могут различаться, не требуя повторного ручного отбора измерений из исходного набора.

Для карты используются MapLibre GL и deck.gl, для графиков — Apache ECharts. Пользователь может просматривать отдельный пост, сравнивать

несколько станций, усреднять одинаковые показатели и сопоставлять месячную динамику за разные годы. На рисунке 5 представлена схема получения данных с одного поста мониторинга и формирования данных.



Рис. 5. Отображение данных с отдельного поста и формирование данных для отображения.

Настройки запроса и графика зависят от выбранного режима. При добавлении величин с различными единицами измерения формируются отдельные оси, сохраняющие числовую определённую показателей.

Применение системы. Работа с модельными данными начинается с выбора показателя и времени, после чего пользователь рассматривает распределение величины на нужных уровнях. Для наблюдений исходными параметрами являются период и состав станций. В обоих случаях приложение получает необходимые данные по запросу и предоставляет средства их анализа в браузере. При этом различия между расчётным массивом и рядами измерений сохраняются на уровне загрузки и обработки.

При изучении эпизода изменения качества воздуха по наблюдениям выделяются интересующий интервал и группа постов. Затем рассматриваются доступные модельные поля концентраций и ветра за соответствующий период. Такой сценарий предполагает последовательную работу в двух приложениях. Автоматическая выборка расчётных значений в координатах станций и вычисление отклонений не входят в описываемые функции. Для содержательного сравнения необходимо согласовать величины, единицы измерения и временное осреднение.

Заключение. Представленное программное обеспечение организует доступ к расчётным полям и наблюдениям с учётом структуры каждого источника. Для результатов WRF-Chem используются файловое хранение, временной каталог

и единое внутреннее представление массивов. Для мониторинга реализованы запросы по станциям и периодам, группировка измерений и подготовка временных рядов. Разделение хранения, загрузки и представления позволяет использовать общую последовательность пользовательских действий при разных способах организации данных.

Список литературы

1. Laniak G.F., Olchin G., Goodall J. et al. Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future // *Environmental Modelling & Software*. — 2013. — Vol. 39. — P. 3–23. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.09.006.
2. Vitolo C., Elkhatib Y., Reusser D. et al. Web technologies for environmental Big Data // *Environmental Modelling & Software*. — 2015. — Vol. 63. — P. 185–198. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.10.007.
3. Grell G.A., Peckham S.E., Schmitz R. et al. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model // *Atmospheric Environment*. — 2005. — Vol. 39, No. 37. — P. 6957–6975. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.
4. Powers J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C. et al. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions // *Bulletin of the American Meteorological Society*. — 2017. — Vol. 98, No. 8. — P. 1717–1737. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00308.1.
5. Rew R., Davis G. NetCDF: an interface for scientific data access // *IEEE Computer Graphics and Applications*. — 1990. — Vol. 10, No. 4. — P. 76–82. DOI: 10.1109/38.56302.
6. Hoyer S., Hamman J.J. xarray: N-D labeled Arrays and Datasets in Python // *Journal of Open Research Software*. — 2017. — Vol. 5, No. 1. — Art. 10. DOI: 10.5334/jors.148.
7. Wilkinson M.D., Dumontier M., Aalbersberg I.J. et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship // *Scientific Data*. — 2016. — Vol. 3. — Art. 160018. DOI: 10.1038/sdata.2016.18.
8. Horsburgh J.S., Tarboton D.G., Maidment D.R., Zaslavsky I. A relational model for environmental and water resources data // *Water Resources Research*. — 2008. — Vol. 44, No. 5. — W05406. DOI: 10.1029/2007WR006392.

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФОРМИРОВАННОЙ КАПЛИ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

У.Д. Сигитова, Р.Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета, г. Бийск, grn@bti.secna.ru

Аннотация. Предложена компьютерная модель генерации синтетических изображений деформированной капли для обучения нейросетевой модели определения площади межфазной поверхности. На основании обзора гидродинамических эффектов, инициирующих деформацию капли в потоке сплошной фазы, предложен способ параметрического задания межфазной поверхности. С использованием методов дифференциальной геометрии получено аналитическое выражение для удельной площади межфазной поверхности. Предложена схема распараллеливания алгоритма генерации изображений, обеспечивающая эффективное формирование обучающей выборки.

Ключевые слова: межфазная поверхность, деформированная капля, параметрическое задание поверхности, дифференциальная геометрия, нейросетевая модель, скоростная киносъемка.

Введение

Формируемая межфазная поверхность является лимитирующим фактором реализации множества химико-технологических процессов, включая экстракцию, абсорбцию, барботаж и реакционные процессы в газожидкостных системах. Интенсивность тепломассообмена прямо пропорциональна площади границы контакта фаз, поэтому экспериментальное определение площади межфазной поверхности представляет собой важную прикладную задачу [1].

Поскольку многие химико-технологические процессы являются быстротекущими, требуется разработка способа оперативного определения межфазной поверхности, способного работать в режиме, близком к реальному

времени. Перспективным подходом представляется определение площади межфазной поверхности по серии изображений, получаемых в результате скоростной киносъёмки.

Поскольку межфазные границы газ-жидкость подвергаются многообразию различных видов деформации, наиболее рациональным является использование нейросетевой модели для определения межфазной поверхности.

Однако для обучения нейросетевой модели, выполняющей такое определение, требуется обширный набор данных, получение которых экспериментальным путём затруднено и является дорогостоящим.

Настоящая работа посвящена созданию компьютерной модели генерации синтетических изображений деформированной капли, которые могут быть использованы для обучения нейросетевой модели определения площади межфазной поверхности. Модель основана на параметрическом задании формы поверхности капли с учётом гидродинамических эффектов и расчёте удельной площади межфазной поверхности методами дифференциальной геометрии.

Параметрическое задание межфазной поверхности

На основании обзора гидродинамических эффектов, сопровождающих движение и деформацию капли в потоке сплошной фазы [2, 3], предложено параметрическое задание межфазной поверхности. Анализ показывает, что при числах Вебера в диапазоне ($10 < We < 100$) доминирует неустойчивость Рэлея–Тейлора, при ($100 < We < 1000$) реализуется режим срыва жидкого пограничного слоя с экватора капли, а при ($We > 1000$) определяющим становится механизм неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [3].

С учётом указанных эффектов форма поверхности деформированной капли в сферической системе координат задаётся радиус-вектором:

$$r(\theta, \varphi) = R_0[1 + \varepsilon f(\theta, \varphi; We, Oh, Re)], \quad (1)$$

где R_0 — радиус невозмущённой сферической капли; ε — малый параметр, характеризующий степень деформации; $f(\theta, \varphi; We, Oh, Re)$ — функция

отклонения формы от сферы, зависящая от числа Вебера We , числа Онезорге Oh и числа Рейнольдса Re . Параметр ε связан со степенью деформированности $R = r_L/r_H$, где r_L и r_H — размеры полуосей капли в продольном и поперечном направлениях соответственно [2]. Для эллипсоидальной деформации функция f принимает вид:

$$f(\theta, \varphi) = P_2(\cos \theta) = (3 \cos^2 \theta - 1) / 2, \quad (2)$$

где P_2 — полином Лежандра второго порядка. При более сложных режимах деформации функция f раскладывается в ряд по сферическим гармоникам $Y(\theta, \varphi)$, что позволяет описывать асимметричные формы, возникающие при срывном разрушении капли [3].

При коротко-волновых деформациях капли, имеющих место быть в ряде быстропротекающих процессов, функция деформации может быть аппроксимирована простейшим выражением:

$$f(\theta, \varphi) = A \sin(n\theta) \sin(m\varphi).$$

Далее описан расчёт удельной межфазной поверхности.

Расчёт удельной площади межфазной поверхности

С использованием дифференциальной геометрии рассчитана удельная площадь межфазной поверхности. Для параметрически заданной поверхности $r = r(\theta, \varphi)$ площадь вычисляется через поверхностный интеграл:

$$S = \int_0^\pi \left(\int_0^{2\pi} \left| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi} \right| d\varphi \right) d\theta; \mathbf{r}(\theta, \varphi) = r(\theta, \varphi) \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{pmatrix}; \quad (3)$$

Векторное произведение $\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi}$ определяет вектор нормали к поверхности, а его модуль равен площади параллелограмма, натянутого на касательные векторы. Через коэффициенты первой квадратичной формы E, F, G выражение (3) переписывается в виде:

$$S = \int_0^\pi \left(\int_0^{2\pi} \sqrt{EG - F^2} d\varphi \right) d\theta; \quad (4)$$

где $E = \left\| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} \right\|^2$, $F = \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi} \right)$, $G = \left\| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi} \right\|^2$.

Удельная площадь межфазной поверхности S_{spec} определяется как отношение полной площади S к объёму капли V .

Распараллеливание алгоритма генерации изображений

Для формирования обучающей выборки требуется генерация большого числа изображений капли при различных значениях параметров We , Oh , Re и углов наблюдения. Алгоритм генерации каждого изображения включает:

- 1) вычисление формы поверхности по формуле (1);
- 2) расчёт площади S и объёма V ;
- 3) проецирование трёхмерной поверхности на плоскость изображения с учётом освещения и оптических искажений;
- 4) растеризацию проекции с заданным разрешением.

Предложено распараллеливание алгоритма генерации изображений по параметрическим комбинациям. Каждая комбинация (We , Oh , Re , угол наблюдения) обрабатывается независимо, что допускает естественное распараллеливание с использованием встроенных средств многопоточности операционной системы.

Сгенерированная выборка содержит изображения с известными значениями S_{spec} , что позволяет использовать их для обучения свёрточной нейронной сети регрессионного типа. Архитектура сети включает входной слой, принимающий изображение капли, последовательность свёрточных и пулинговых слоёв для извлечения признаков и полносвязные слои с выходом, равным значению удельной площади межфазной поверхности.

Заключение.

Разработана компьютерная модель генерации синтетических изображений деформированной капли для обучения нейросетевой модели, предназначено для определения площади межфазной поверхности. На основании обзора гидродинамических эффектов предложено параметрическое задание межфазной поверхности в виде разложения по сферическим гармоникам с параметрами We , Oh , Re . С использованием дифференциальной геометрии получены аналитические и численные выражения для удельной площади межфазной поверхности. Предложена схема распараллеливания алгоритма генерации изображений. Дальнейшие работы связаны с обучением нейросетевой модели на сгенерированной выборке и валидацией результатов на экспериментальных данных скоростной киносъёмки.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №23-12-00278-П, <https://rscf.ru/project/23-12-00278-П/>.

Список литературы

1. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
2. Матюхин, С. И. Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность / С. И. Матюхин, К. Ю. Фроленков // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2013. – Т. 15. – № 3. – С. 292–304.
3. Theofanous T. Aerobreakup of Newtonian and viscoelastic liquids // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2011. – 43(1). – P. 661–690.

КВАЗИКЛАССИЧЕСКИЕ АСИМПТОТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ФИШЕРА-КПП С ФРАКТАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ПО ВРЕМЕНИ

С.А.Синюков¹, А.В. Шаповалов¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

Физический факультет, каф. теоретической физики

Метод квазиклассически сосредоточенных состояний, основанный на теории ростка Маслова [1] первоначально разработанный в квантовой теории, находит широкое применение в ряде линейных и нелинейных задач математической физики. В данной работе расширяется формализм метода квазиклассических асимптотик на нелокальное обобщенное популяционное уравнение Фишера–КПП [2] с фрактальной производной по времени ($D_{F,t}^\alpha, t \geq 0$) порядка α ($0 < \alpha \leq 1$) [3] в случае одной пространственной переменной x , $-\infty < x < +\infty$, которое в безразмерном виде записывается следующим образом:

$$-D_{F,t}^\alpha u(x,t) + \chi_F(t) \left(\varepsilon u_{xx}(x,t) + a(x,t)u(x,t) - \kappa u(x,t) \int_{-\infty}^{+\infty} b(x,y,t)u(y,t)dy \right) = 0, \quad (1)$$

Здесь полагаем, что вещественная функция $u(x,t)$ представляет популяционную плотность и гладко зависит от своих аргументов таким образом, что выполняемые операции имеют смысл. Функция $u(x,t)$ по переменной x принадлежит пространству Шварца вместе со своими производными, что обеспечивает существование интеграла в уравнении (1) и существование всех необходимых в дальнейшем моментов. Фрактальная производная по времени $D_{F,t}^\alpha$ вводится в рамках F^α -исчисления [4, 5] на фрактальном множестве $F \subset [0, T] \subset \mathbb{R}^1$, где время $t \in [0, T]$. Функция $\chi_F(t)$ - характеристическая функция на F такая что:

$$\chi_F(x) = \begin{cases} 1, & x \in F, \\ 0, & x \notin F. \end{cases}$$

Заданные вещественные функции $a(x, t)$ и $b(x, y, t)$ гладко зависят от своих аргументов и могут возрастать не быстрее, чем полиномы при $|x|, |y| \rightarrow \infty$; для удобства в уравнении (1) в явном виде выделен вещественный параметр нелинейности $\kappa (> 0)$; ε обозначает коэффициент диффузии, который будет выполнять роль малого асимптотического параметра, $\varepsilon \rightarrow 0$. Частные производные обозначены как $u_x = \partial_x u = \partial u / \partial x$, $u_{xx} = \partial^2 u / \partial x^2$ и т.д. Интегральное выражение $-\kappa u(x, t) \int_{-\infty}^{+\infty} b(x, y, t) u(y, t) dy$ в уравнении (1) описывает нелокальные конкурентные потери в популяции, нелокальность взаимодействия в популяции характеризуется функцией влияния $b(x, y, t)$; коэффициент $a(x, t)$ задает темп роста (для $a(x, t) > 0$) популяционной плотности $u(x, t)$.

В рамках приближения слабой диффузии ($\varepsilon \rightarrow 0$) выводятся асимптотические решения, которые описывают фрактальную динамику квазичастиц. Уравнение Фишера–КПП разлагается на систему нелинейных уравнений, описывающих динамику взаимодействующих квазичастиц в классе траекторно-сосредоточенных функций $P_{(\alpha)t}^\varepsilon$, общий элемент которого задается как:

$$P_{(\alpha)t}^\varepsilon = \left\{ \Phi : \Phi(x, t, \varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \exp \left(\frac{1}{\varepsilon} R(t, \varepsilon) \right) \varphi \left(\frac{\Delta x}{\sqrt{\varepsilon}}, t, \varepsilon \right) \right\}, \quad (2)$$

где $\Delta x = x - X(t, \varepsilon)$, вещественные функции $X(t, \varepsilon)$ и $R(t, \varepsilon)$ являются произвольными функциональными параметрами класса, функция $\varphi(\eta, t, \varepsilon)$ вместе со своими производными принадлежит пространству Шварца по вещественной переменной η , функции $X(t, \varepsilon)$ и $\varphi(\eta, t, \varepsilon)$ регулярно зависят от $\sqrt{\varepsilon}$ в окрестности нуля, а также имеют F^α -производную по t .

С помощью оценок

$$\hat{p} = \varepsilon \partial_x = \hat{O}(\sqrt{\varepsilon}), \quad \Delta x_s = \hat{O}(\sqrt{\varepsilon}), \quad \hat{p}^k \Delta x_s^l = \hat{O}(\varepsilon^{(k+l)/2}), \quad D_{F,t}^\alpha = \hat{O}(1), \quad (3)$$

можно получить приближенную с заданной точностью динамическую систему моментов (систему Эйнштейна–Эренфеста) отдельной квазичастицы s в классе

функций вида (2). Решение уравнения (1) при этом ищется в виде

$u(x, t, \varepsilon) = \sum_1^K u_s(x, t, \varepsilon)$, где K - число квазичастиц. Здесь $\hat{A} = \hat{O}(\varepsilon^\mu)$, если

$\|\hat{A}u_s\|/\|u_s\| = O(\varepsilon^\mu)$ для любой функции $u_s(x, t)$ из $P_{(\alpha)t}^\varepsilon$, а $\|u_s\| = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} u_s^2(x, t, \varepsilon) dx\right)^{1/2}$ (L_2 норма для u_s).

В данной работе система Эйнштейна-Эренфеста ограничена до момента второго порядка включительно, так как асимптотические решения уравнения (1) строятся вплоть до главного члена асимптотики (с точностью $O(\varepsilon^{3/2})$). Моменты определяются в классе функций $P_{(\alpha)t}^\varepsilon$ следующим образом:

$$\begin{aligned}\mu_s(t, \varepsilon) &= \int_{-\infty}^{\infty} u_s(x, t, \varepsilon) dx, \quad x_s(t, \varepsilon) = \frac{1}{\mu_{u_s}(t, \varepsilon)} \int_{-\infty}^{\infty} x u_s(x, t, \varepsilon) dx, \\ \alpha_s^{(2)}(t, \varepsilon) &= \frac{1}{\mu_s(t, \varepsilon)} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta x_s^2 u_s(x, t, \varepsilon) dx,\end{aligned}\quad (4)$$

где μ_{u_s} и x_{u_s} моменты нулевого и первого порядка соответственно, а $\alpha_{u_s}^{(2)}$ 2й центральный момент $u_s(x, t, \varepsilon)$. На функциональный параметр $x(t, \varepsilon)$, входящий в функции класса $P_{(\alpha)t}^\varepsilon$ накладывается условие $x_s(t, \varepsilon) = x_{u_s}(t, \varepsilon)$. Тогда функция $u_s(x, t, \varepsilon) \in P_{(\alpha)t, s}^\varepsilon$ концентрируется в пространственной окрестности кривой $x = x_{u_s}(t, \varepsilon)$.

Фрактальная система Эйнштейна-Эренфеста имеет вид:

$$\begin{aligned}D_{F,t}^\alpha \mu_s(t, \varepsilon) &= \chi_F(t) \mu_s \left[a_{(s)0} + \frac{1}{2} \left(a_{(s)2} - \kappa \sum_{s=1}^K b_{(s,s)2,0} \mu_s^- \right) \alpha_s^{(2)} - \right. \\ &\quad \left. - \kappa \left(\sum_{s=1}^K b_{(s,s)0,0} \mu_s^- + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^K b_{(s,s)0,2} \mu_s^- \alpha_s^{(2)} \right) \right], \\ D_{F,t}^\alpha x_s &= \chi_F(t) \alpha_s^{(2)} \left(a_{(s)1} - \kappa \sum_{s=1}^K b_{(s,s)1,0} \mu_s^- \right), \\ D_{F,t}^\alpha \alpha_s^{(2)} &= 2\varepsilon \chi_F(t).\end{aligned}\quad (5)$$

$$\text{Здесь} \quad a_{(s)k}(t, \varepsilon) = \frac{\partial^k a(x, t)}{\partial x^k} \Big|_{x=x_s(t, \varepsilon)}, \quad \text{а} \quad b_{(s,s)k,l}(t, \varepsilon) = \frac{\partial^{k+l} b(x, y, t)}{\partial x^k \partial y^l} \Big|_{\substack{x=x_s(t, \varepsilon) \\ y=x_s(t, \varepsilon)}} \quad ($$

$$b_{(s,s)k,l}(t, \varepsilon) = b_{(s)k,l}(t, \varepsilon)).$$

Ключевым элементом в построении приближенных квазичастичных решений является взаимодействие между динамической системой моментов (5) и вспомогательной линейной системой уравнений, которая связана с исходной нелинейной системой [3].

Рассмотрен пример построения асимптотического решения с двумя квазичастицами $s = 1, 2$ для уравнения (1) на интервале $t \in [0, 1]$, где $F \subset [0, 1]$, $F = C^\alpha$ - канторово множество хаусдорфовой размерности (α) . Начальные условия выбираются в виде гауссовых волновых пакетов:

$$\varphi_s(x, \varepsilon) = (\varepsilon)^{-1/2} N_s \exp \left(-\frac{(x - x_s(0))^2}{2\varepsilon\sigma_s^2} \right), \quad (6)$$

которые локализованы в окрестности $x = x_s(0)$ для s -й квазичастицы с параметром нормировки N_s . Параметр $\sigma_s (>0)$ характеризует ширину гауссова распределения. Также коэффициент уравнения (1) $(b(x, y, t))$ выбирается в гауссовой форме $b(x, y, t) = b(x - y) = b_0 \exp \left[-\frac{(x - y)^2}{\xi^2} \right]$, а коэффициент $a(x, t) = \text{const} = a$ берется как константа, где b_0 представляет собой амплитуду функции влияния $b(x, y, t)$, а $\xi (>0)$ характеризует ширину распределения гауссова пакета.

Тогда квазичастичное асимптотическое решение уравнения (1), точное до $O(\varepsilon^{3/2})$ для двух квазичастиц задается формулой:

$$u(x, t, \varepsilon) = u_1(x, t, \varepsilon) + u_2(x, t, \varepsilon) = v(x, t, \mathbf{C} \left[\begin{array}{c} \bar{\varphi} \end{array} \right], \varepsilon) + O(\varepsilon^{3/2}) \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} v(x, t, \mathbf{C} \left[\begin{array}{c} \bar{\varphi} \end{array} \right], \varepsilon) = & v_1^{(0)}(x, t, \mathbf{C} \left[\begin{array}{c} \bar{\varphi} \end{array} \right], \varepsilon) + v_2^{(0)}(x, t, \mathbf{C} \left[\begin{array}{c} \bar{\varphi} \end{array} \right], \varepsilon) + \varepsilon^{1/2} \left(v_1^{(1)}(x, t, \mathbf{C} \left[\begin{array}{c} \bar{\varphi} \end{array} \right], \varepsilon) + \right. \\ & \left. + v_2^{(1)}(x, t, \mathbf{C} \left[\begin{array}{c} \bar{\varphi} \end{array} \right], \varepsilon) \right) + \varepsilon \left(v_1^{(2)}(x, t, \mathbf{C} \left[\begin{array}{c} \bar{\varphi} \end{array} \right], \varepsilon) + v_2^{(2)}(x, t, \mathbf{C} \left[\begin{array}{c} \bar{\varphi} \end{array} \right], \varepsilon) \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь интегральные константы $\mathbf{C}$ находятся из решения динамической системы Эйнштейна-Эренфеста для начального условия (6). Функции $v_s^{(k)}(x, t, \mathbf{C} \left[\begin{array}{c} \bar{\varphi} \end{array} \right], \varepsilon)$ ($s = 1, 2, k = 0, 1, 2$) в (8) задаются как решение задачи Коши ассоциированной с (1) линейной системой уравнений [3].

В рассмотренных примерах соответствующие префракталы пятого поколения принимаются в качестве приближенных канторовых множеств.

Построенные асимптотические решения демонстрируют нетривиальную геометрическую структуру. Каждое решение включает конечное число локализованных распределений (квазичастиц), причем каждая квазичастица сосредоточена в определенной пространственной окрестности, определяющей ее координаты. Полученные частные решения показывают, что диффузия, управляемая фрактальной производной по времени ($D_{F,t}^{\alpha}$) с $\alpha < 1$, протекает быстрее, чем диффузия, описываемая стандартной производной первого порядка ($\alpha = 1$). Это ускорение обусловлено природой лежащих в основе временных интервалов: в то время как обычная диффузия непрерывно развивается во времени, фрактальная диффузия $\alpha < 1$ протекает скачкообразно, причем события происходят в дискретных точках внутри фрактального канторова временного множества. Однако стоит отметить, что по мере увеличения префрактального порядка увеличение скорости диффузии уменьшается. Это наблюдение согласуется с концептуальным пониманием фрактальных временных интервалов, поскольку префракталы более высокого порядка содержат увеличенное число дискретных точек, что приводит к уменьшению величины скачков во время диффузии.

Математические свойства системы Эйнштейна-Эренфеста представляют значительный интерес в теории фрактальных дифференциальных уравнений, поскольку эта система возникает в физических и биологических моделях, описывающих реальные системы со сложными структурными свойствами.

Рассмотренный в работе подход позволяет асимптотически свести исследование решений уравнения в частных производных с дробной производной по времени и нелокальной нелинейностью по пространственной переменной (1) к исследованию обыкновенных дифференциальных уравнений с дробной производной.

Список литературы

1. Maslov, V.P. The Complex WKB Method for Nonlinear Equations. I. Linear Theory. -Birkhauser Verlag: Basel, Switzerland, 1994. – 300 p.
2. Kulagin, A.E. Quasiparticles for the one-dimensional nonlocal Fisher-Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov equation / A.E. Kulagin, A.V. Shapovalov – Physica Scripta, 2024. – Vol. 99. – 27 p.
3. Shapovalov A.V. Quasiparticle Solutions to the 1D Nonlocal Fisher–KPP Equation with a Fractal Time Derivative in the Weak Diffusion Approximation / A.V. Shapovalov, S.A. Siniukov – Fractal and Fractional, 2025. – Vol. 9. – № 5. – Art. num. 279.
4. Parvate, A. Calculus on fractal subsets of real line–I: Formulation / A. Parvate, A.D. Gangal – Fractals, 2009. – Vol. 17. – 53–81 pp.
5. Parvate, A. Calculus on fractal subsets of real line–II: Conjugacy with ordinary calculus / A. Parvate, A.D. Gangal – Fractals, 2011. – Vol. 19. – 271–290 pp.
6. Maslov, V.P. The Complex WKB Method for Nonlinear Equations. I. Linear Theory. -Birkhauser Verlag: Basel, Switzerland, 1994. – 300 p.

КРИТИЧЕСКИЕ ИНДЕКСЫ И ДИНАМИЧЕСКИЙ СКЕЙЛИНГ В РАМКАХ ПОДХОДА Л.Д. ЛАНДАУ К ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В.Н. Удодов¹

¹Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова,
Инженерно-технологический институт, каф.производственного, гражданского
строительства и техносферной безопасности, каф.программного обеспечения
вычислительной техники и автоматизированных систем, udodov@khsu.ru

1. Введение

Явление турбулентности широко распространено в природе и технике. В работе Л.Д. Ландау [1-2] рассмотрен фазовый переход (ФП) от ламинарного движения к турбулентному для однородной среды. В [3, 4] развиты идеи Ландау для однородной и неоднородной турбулентности, в [5] построена теория турбулентности в рамках статического скейлинга (более подробную библиографию по турбулентности см. в [3-5]). Ниже в рамках общей теории фазовых переходов (ТФП) Ландау и скейлинговой ТФП [6-9] развита новая теория турбулентности с учётом динамического скейлинга, обобщающая подход Л.Д. Ландау, и вычислены критические индексы.

2. Теория Ландау

Напомним теорию Ландау турбулентности [1, 2]. Известно, что при числе Рейнольдса меньше критического

$$R < R_c \quad (1)$$

ламинарное движение устойчиво, в обратном случае ламинарное движение не устойчиво и появляются периодические движения с комплексными частотами [2]

$$\omega = \omega_1 + i\gamma_1, \quad (2)$$

где γ_1 – мнимая часть частоты, причём она отрицательна при малых R . При $R = R_c$ появляется частота, мнимая часть которой обращается в нуль [1-2]. При $R > R_c$ у этой частоты $\gamma_1 > 0$. Возмущение скорости (отклонение от ламинарного движения), соответствующее этой частоте, имеет вид [1]:

$$V_1 = A(t)f(\vec{r}), \quad (3)$$

где f – комплексная функция координат, а амплитуда возмущения скорости для малых времен равна [1, 2]

$$A(t) = \text{const} * e^{\gamma_1 t} e^{-i\omega_1 t} . \quad (4)$$

Производная по времени от квадрата модуля амплитуды ($|A|^2 = A \cdot A^* = x$, звездочка обозначает комплексное сопряжение) равна

$$\frac{d|A|^2}{dt} = \frac{dx}{dt} = 2\gamma_1 x . \quad (5)$$

Это начало разложения в ряд по x [1-4]. Разложение имеет вид [1]

$$\frac{dx}{dt} = 2\gamma_1 x - \alpha_0 x^2 - \alpha_1 x^3 , \quad (6)$$

где α_0 – постоянная Ландау; α_1 – положительная константа. Величина γ_1 зависит от R , в простейшем приближении имеем [1] (это соответствует обычной теории ФП Ландау [8])

$$\gamma_1 \approx a(R - R_c) = a\varepsilon . \quad (7)$$

Для экзотической трикритической точки будет [3, 4]

$$\gamma_1 \approx a(R - R_c)^3 \propto \varepsilon^3 . \quad (8)$$

В общей ТФП Ландау есть параметр порядка (ПП) η [3, 5], который равен нулю в неупорядоченной фазе (НФ)) и отличен от нуля в упорядоченной фазе (УФ). Оказывается, в теории турбулентности Ландау ПП – это амплитуда возмущения скорости [3, 4]

$$\eta = A(t) , \quad (9)$$

квадрат модуля которой обозначен здесь за x . Управляющим параметром является число Рейнольдса R . Поскольку амплитуда возмущения скорости среды комплексная функция, то ПП для ФП от ламинарного движения к турбулентному является двухкомпонентным [3], так же как в теории сверхтекучести [6]. Если считать, что турбулентность является изотропной [2], как и сверхтекучесть в гелии – 4, то эти два явления принадлежат к одному классу универсальности [3].

3. Динамический скейлинг

Гипотеза динамического подобия (скейлинга) имеет вид [9]

$$\omega = k^z f_1(k\xi) , \quad (10)$$

где ω – частота мягкой моды, $k=(2\pi)/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $z>0$ – динамический критический индекс, ξ – корреляционная длина [8]. Функция f_1 удовлетворяет требованию [9]

$$f_1(0) = \text{const} > 0 \quad . \quad (10')$$

Отсюда можно показать, что выполняется соотношение между индексами [9] (это прямое следствие динамического скейлинга)

$$y = \nu z \quad , \quad (11)$$

где y – еще один динамический (кинетический) индекс, ν – критический индекс корреляционной длины [8]. Кинетические индексы y и z для времени релаксации ПП для температурных ФП определяются следующим образом [9]

$$\tau \propto |\varepsilon|^{-y} \quad , \quad \varepsilon \rightarrow 0, k = 0, y > 0 \quad , \quad (12)$$

$$\varepsilon = T - T_c \quad , \quad (13)$$

$$\tau \propto k^{-z} \quad , \quad \varepsilon = 0, z > 0 \quad . \quad (14)$$

Для турбулентности в рамках обычной теории Ландау

$$\varepsilon = R - R_c \quad , \quad (15)$$

R_c – критическое число Рейнольдса.

Более общая формула имеет вид [4] (γ_1 см. (4) – (8))

$$\tau \propto |\gamma_1|^{-1} \quad . \quad (16)$$

Из (12) отсюда следует, что для обычной теории турбулентности Ландау [4]

$$y = 1. \quad (17)$$

Однако для экзотической трикритической точки турбулентности (когда критический индекс ПП равен единице) [3]

$$y = 3. \quad (18)$$

Кинетический индекс z для турбулентности в теории Ландау равен [4, 9]

$$z = 2. \quad (19)$$

Для проверки гипотезы динамического скейлинга (подобия) (11) найдем критический индекс корреляционной длины

$$\xi \propto |\gamma_1|^{-1/2} \propto |\varepsilon|^{-\nu}. \quad (20)$$

Из (7) и (20) найдем индекс корреляционной длины

$$\nu = 1/2. \quad (21)$$

Это соответствует обычной ТФП Ландау [8], однако для экзотической трикритической точки верно (8) и значение индекса изменится

$$v_{\text{экзот}} = 3/2. \quad (22)$$

Теперь можно проверить гипотезу динамического скейлинга (11) для классической теории Ландау

$$y = 1 = \left(\frac{1}{2}\right) * 2 = 1 = \nu z, \quad (23)$$

которая выполняется, чего и следовало ожидать. Для экзотической трикритической точки гипотеза также выполняется (см. (18), (19) и (22))

$$y = 3 = \left(\frac{3}{2}\right) * 2 = 3 = \nu z. \quad (24)$$

Коэффициент γ_1 в (6) должен менять знак в точке ФП [8], то есть ε должна быть в нечетной степени (см. (7) и (8)). Возможен более экзотический случай (экзотика-2), чем (8), когда

$$\gamma_1 \approx a(R - R_c)^5 \propto \varepsilon^5. \quad (25)$$

В этом случае кинетический индекс y и индекс восприимчивости γ равны

$$\gamma_{\text{экз-2}} = y_{\text{экз-2}} = 5. \quad (26)$$

В этом более экзотическом случае индекс корреляционной длины равен

$$\nu_{\text{экз-2}} = 5/2. \quad (27)$$

Гипотеза динамического скейлинга

$$y_{\text{экз-2}} = 5 = \left(\frac{5}{2}\right) * 2 = 5 = \nu z \quad (28)$$

выполняется и в этом случае. Эти результаты верны в рамках обобщенной теории турбулентности Ландау.

4. Статические критические индексы

Найдем теперь остальные критические индексы в рамках теории Ландау турбулентности. Равенство Эссама и Фишера имеет вид [8]

$$\alpha + 2\beta + \gamma = 2. \quad (29)$$

Остальные равенства имеют следующий вид. Равенство Уидома [8]

$$\beta\delta = \beta + \gamma. \quad (30)$$

Приведем остальные равенства [8].

$$\alpha = \varepsilon(\beta + \gamma). \quad (31)$$

Индексы δ и ε определяются для случая предельно сильных полей [8], например, для параметра порядка и для теплоёмкости

$$\eta \propto h^{\frac{1}{\delta}} (\delta > 0, h > 0) ; \quad (32)$$

$$C \propto h^{-\varepsilon} (\varepsilon > 0, h > 0) . \quad (33)$$

Для случая сильных полей вводят еще один индекс μ для корреляционного радиуса [8]

$$\xi \propto h^{-\mu} (\mu > 0, h > 0) . \quad (34)$$

Ещё два равенства универсальны и выполняются в теории ФП Ландау [8]

$$\nu = \mu(\beta + \gamma) , \quad (35)$$

$$\gamma = \nu(2 - \zeta) . \quad (36)$$

В рамках классической теории ФП Ландау индексы известны [8] и все соотношения между ними выполняются, кроме соотношения, следующего из гипотезы статического скейлинга (для трехмерного пространства)

$$\nu d = 2 - \alpha , \quad (37)$$

здесь d – размерность пространства. Это равенство верно в классической теории ФП Ландау в четырехмерном пространстве, так как индекс корреляционной длины в обычной теории ФП Ландау равен $\nu=0,5$ (см. (21)), а индекс теплоемкости равен $\alpha=0$ [8]. Если учесть, что индекс ПП в обычной теории ФП Ландау [8] (и в теории турбулентности Ландау [3]) равен $\beta=0,5$, индекс восприимчивости равен [4, 8] $\gamma=1$, то соотношение (29) выполняется.

Индексы ПП β и восприимчивости γ для экзотической трикритической точки турбулентности известны [3-5]

$$\beta_{\text{экзот}} = 1, \gamma_{\text{экзот}} = 3 . \quad (38)$$

Из (29) теперь найдем критический индекс теплоемкости

$$\alpha_{\text{экзот}} = 2 - 2\beta - \gamma = 2 - 5 = -3 . \quad (39)$$

Из формул (22), (38) и равенства (36) найдем индекс ζ для экзотической трикритической точки турбулентности

$$\zeta_{\text{экзот}} = 2 - \frac{\gamma}{\nu} = 2 - \frac{3}{\frac{1}{2}} = 0 . \quad (40)$$

Это значение совпадает со значением индекса ζ в классической теории ФП Ландау [8]. Для второй экзотической точки также

$$\zeta_{\text{ЭКЗ-2}} = 2 - \frac{\gamma}{\nu} = 2 - \frac{5}{\frac{5}{2}} = 0 . \quad (41)$$

Из равенства (35) найдем индекс μ для экзотической трикритической точки

$$\mu_{\text{ЭКЗОТ}} = \frac{\nu}{(\beta+\gamma)} = \frac{3/2}{1+3} = \frac{3}{8} . \quad (42)$$

Найдем индекс ПП β для второй критической точки по аналогии с [4] (см. (25))

$$|\eta|^2 = -b\varepsilon \pm (b^2\varepsilon^2 + 2a\varepsilon^5)^{\frac{1}{2}} = -b\varepsilon \pm \varepsilon(b^2 + 2a\varepsilon^3)^{\frac{1}{2}} . \quad (43)$$

Выражение в скобках преобразуем в квадрат суммы с точностью до бесконечно малых высшего порядка ($\varepsilon = R - R_c \approx 0$)

$$b^2 + 2a\varepsilon^3 \cong b^2 + 2\left(\frac{b(a\varepsilon^3)}{b}\right) + (a^2\varepsilon^6)/(b^2) ,$$

$$b^2 + 2a\varepsilon^3 \cong (b + \frac{a\varepsilon^3}{b})^2 . \quad (44)$$

(43) примет вид

$$|\eta|^2 \cong -b\varepsilon \pm \varepsilon(b + (a\varepsilon^3)/b) . \quad (45)$$

Нижний знак не имеет физического смысла, т. к. левая часть неотрицательна ($b > 0, a > 0$)

$$|\eta|^2 \cong -b\varepsilon + \varepsilon b + \frac{a\varepsilon^4}{b} = \frac{a\varepsilon^4}{b} . \quad (46)$$

По определению критического индекса ПП имеем

$$|\eta|^2 \cong \frac{a\varepsilon^4}{b} \propto \varepsilon^{2\beta} , \quad (47)$$

следовательно, для второй экзотической трикритической точки индекс ПП равен двойке, что очень необычно

$$\beta_{\text{ЭКЗ-2}} = 2 . \quad (48)$$

Найдем индекс δ в рамках теории ФП Ландау, используя равенство (30), сначала для экзотической трикритической точки турбулентности (см. (38)).

$$1 * \delta = 1 + 3 ,$$

$$\delta_{\text{ЭКЗОТ}} = 4 , \quad (49)$$

это отличается от значения в классической теории ФП Ландау, где $\delta = 3$ [8].

Для второй экзотической точки индекс δ равен (см. (26), (30) и (48))

$$2 * \delta = 2 + 5, \delta_{\text{ЭКЗ-2}} = 7/2 . \quad (50)$$

В заключение проверим равенство (37) для экзотических трикритических точек

$$\begin{aligned} \nu d &= \frac{3}{2}d = 2 - (-3) = 5, \\ d &= \frac{10}{3}. \end{aligned} \quad (51)$$

В пространстве такой размерности верна теория Ландау турбулентности для экзотической трикритической точки.

Для второй экзотической точки индекс теплоёмкости равен (см. (26), (27))

$$\alpha_{\text{ЭКЗ-2}} = 2 - 2\beta - \gamma = 2 - 4 - 5 = -7. \quad (52)$$

Теперь проверим следствие статического скейлинга (37)

$$\begin{aligned} \nu d_{\text{ЭКЗ-2}} &= \frac{5}{2}d_{\text{ЭКЗ-2}} = 2 - (-7) = 9, \\ d_{\text{ЭКЗ-2}} &= \frac{18}{5} = 3,6. \end{aligned} \quad (53)$$

При такой размерности пространства верна теория Ландау турбулентности для второй трикритической точки.

Для проверки этих результатов нужны экспериментальные исследования турбулентности, а также развитие микроскопической теории турбулентности, что является задачей на будущее. Желательно также сопоставление полученных результатов с известными теориями турбулентности, для чего также необходимы дополнительные идеи и исследования.

5. Заключение

Высказано предположение, что в рамках обобщенной теории турбулентности Ландау возможно существование экзотической трикритической точки второго типа, когда критический индекс параметра порядка равен двойке.

Показано, что гипотеза динамического скейлинга выполняется в обобщенной теории турбулентности Ландау, в том числе для экзотической трикритической точки и для экзотической точки второго типа.

Найден критический индекс корреляционной длины для экзотической трикритической точки и для экзотической точки второго типа. Найден критический индекс восприимчивости и динамический индекс u для критической точки турбулентности второго типа.

Найдены все статические критические индексы в обобщенной теории турбулентности Ландау для экзотических критических точек двух видов.

Желательно экспериментальное определение как статических, так и динамических критических индексов для начальной стадии развития турбулентности. Видимо это возможно также в рамках микроскопической теории турбулентности, что является задачей предстоящих исследований.

Список литературы

1. Ландау Л.Д. К проблеме турбулентности / Л.Д.Ландау // ДАН СССР. — 1944. — Т.44. С.339 – 344.
2. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т.6. Гидродинамика. 4-е изд. / Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. — М., Наука, 1988. — 733 с.
3. Удодов В.Н. Новые аспекты теории турбулентности Л.Д. Ландау / В.Н.Удодов // Южно-Сибирский научный вестник. — 2023. — №.1 (47). С.10 – 15. DOI 10.25699/SSSB.2023.47.1.008.
- 4 Удодов В.Н. Кинетика неоднородной турбулентности в рамках теории фазовых переходов Ландау / В.Н.Удодов // Южно-Сибирский научный вестник. — 2023. — №.6 (52). С.87 – 93. DOI 10.25699/SSSB.2023.52.6.010.
5. Удодов В.Н. Новая скейлинговая теория турбулентности в рамках подхода Ландау Л.Д. / В.Н.Удодов // Южно-Сибирский научный вестник. — 2026. — №.1 (65). С.199 – 205.
6. Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.9. Статистическая физика. Часть 2. Теория конденсированного состояния / Е.М.Лифшиц, Л.П.Питаевский. — М.: [Физматлит](#), 2004. — 496 с.
7. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т.6. Гидродинамика. 4-е изд. / Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. — М., Наука, 1988. — 733 с.
8. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т.5. Статистическая физика. Ч. 1. 4-е изд. / Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. — М., Наука, 1995. — 608 с.
9. Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.10. Физическая кинетика. — Изд. 2 / Е.М.Лифшиц, Л.П.Питаевский. — М.: [Физматлит](#), 2007. — 536 с.

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКСТРЕННЫХ СЛУЖБ НА БАЗЕ MAPLIBRE

Г.Ю. Шамсудинов

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
научно-технический центр, отдел прикладных исследований и
инновационных технологий

Современная деятельность экстренных служб непосредственно связана с обработкой значительного объема пространственной информации [1]. Местоположение подразделений, характеристики дорожной сети, размещение объектов инфраструктуры, удаленность места вызова и особенности территории оказывают непосредственное влияние на процесс движения и оценки деятельности этих служб. В связи с этим геоинформационные технологии являются естественной основой для построения моделей, позволяющих воспроизводить перемещение сил и средств и исследовать изменение параметров реагирования в различных условиях.

Имитационные системы, предназначенные для исследования процессов функционирования экстренных служб, разрабатывались и ранее [2-3]. В частности, отдельные программные комплексы позволяли моделировать движение подразделений, изменение оперативной обстановки и использование ресурсов. Вместе с тем значительная часть подобных решений создавалась с учетом программных и картографических технологий своего времени, что ограничивает возможности их дальнейшего развития, интеграции современных пространственных данных и создания интерактивного пользовательского интерфейса.

Современный этап развития веб-геоинформационных технологий позволяет по-новому подойти к построению подобных систем. В качестве картографической основы могут использоваться современные программные библиотеки, обеспечивающие аппаратно ускоренную визуализацию пространственных данных, динамическое изменение слоев, отображение

трехмерной застройки и интерактивное взаимодействие пользователя с объектами карты. Одним из таких инструментов является MapLibre, позволяющий создавать высокопроизводительные веб-картографические приложения и использовать карту не только как средство отображения информации, но и как непосредственно взаимодействующую с расчетной моделью пространственную среду [4].

В связи с этим актуальной является разработка современного геоинформационного имитационного комплекса, в котором возможности веб-картографии объединяются с имитационной моделью функционирования экстренных служб.

В рамках проводимого исследования авторами разработан программный прототип геоинформационной платформы имитационного моделирования деятельности экстренных служб на базе MapLibre. Созданная среда объединяет картографическое представление территории с элементами имитационной модели и обеспечивает визуальное воспроизведение происходящих в ней процессов. В отличие от традиционного двухмерного картографического представления, в программной среде реализована возможность формирования трехмерной городской застройки, что позволяет представить исследуемую территорию в более наглядном виде и сохранить пространственную привязку объектов модели.

Трехмерное представление используется непосредственно в интерактивной картографической среде - здания располагаются в соответствии с их фактическим пространственным положением, а пользователь может изменять масштаб, угол обзора и положение карты. При этом трехмерная визуализация не формируется как отдельная сцена, а является частью геоинформационной среды, в которой в дальнейшем выполняется имитационное моделирование движения сил и средств. На рисунке 1 представлен пример трехмерной визуализации зданий.

Отдельное внимание при разработке уделено возможности адаптации визуального представления программного комплекса под различные задачи. В систему предусмотрена загрузка пользовательских графических и трехмерных объектов, которые могут использоваться для представления элементов имитационной модели. В частности, пользователь может применять как условные

картографические обозначения, так и собственные трехмерные модели транспортных средств.

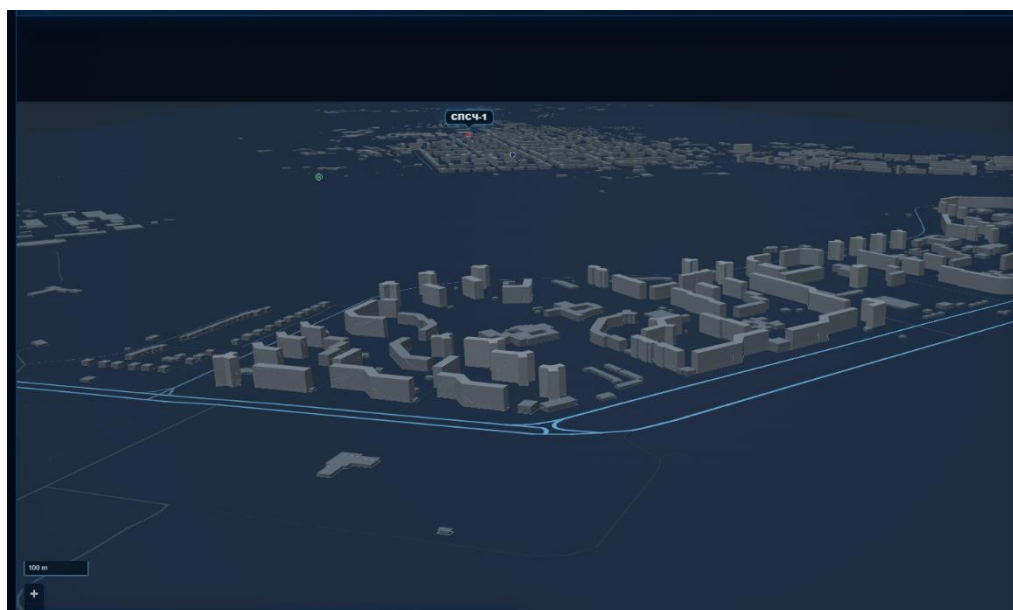
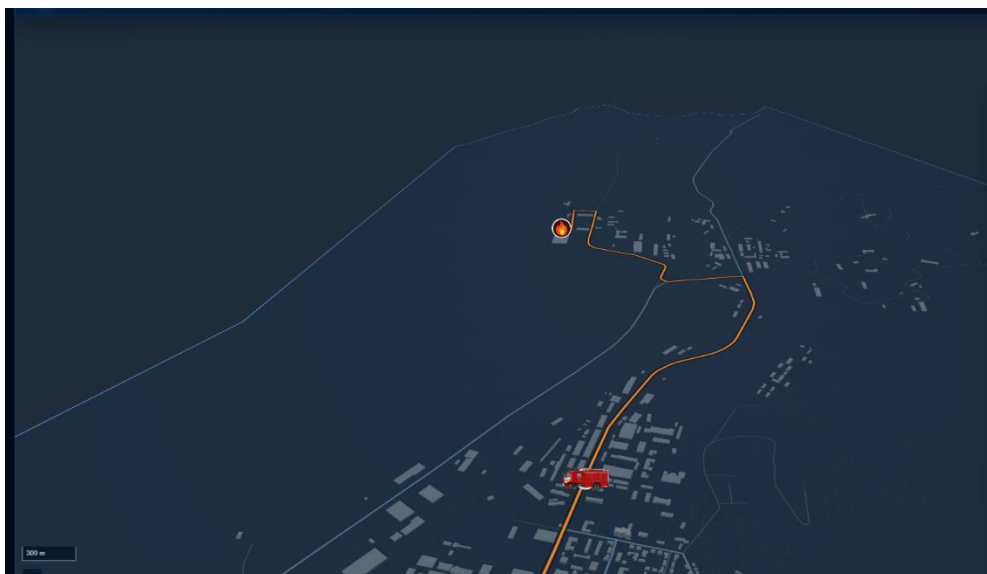


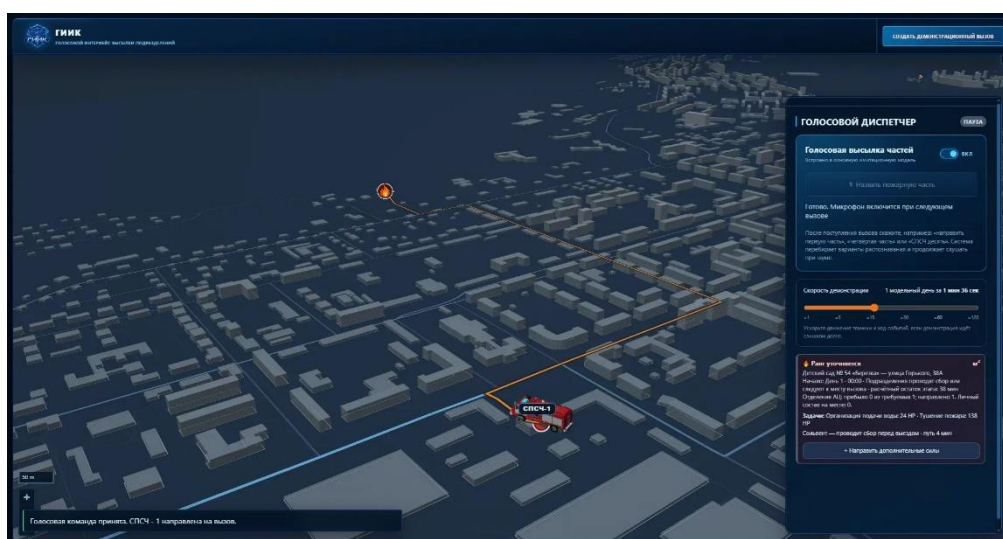
Рис. 1. Трехмерное представление зданий с учетом их таблиц атрибутов (высота зависит от значения в таблице атрибутов Level).

Это позволяет отказаться от жестко заданного набора стандартных символов и формировать визуальное представление с учетом особенностей конкретного исследования. Например, пожарный автомобиль, автомобиль скорой медицинской помощи или транспортное средство другой экстренной службы может отображаться на карте не только условным значком, но и соответствующей трехмерной моделью. Загруженный объект связывается с транспортной единицей имитационной модели и в дальнейшем используется для отображения ее пространственного положения и перемещения по территории. На рисунке 2 представлен пример отображения движимых объектов.

Одним из ключевых элементов разработанной программной среды является имитационная модель движения транспортных средств экстренных служб по дорожной сети. В отличие от упрощенного подхода, при котором скорость следования принимается постоянной на всем маршруте, в разработанной системе дорожная сеть рассматривается как совокупность отдельных участков, характеристики которых могут различаться.



А)



Б)

Рис. 2. Отображение движимых объектов на картографической подложке (А – двумерное отображение при отдаленном масштабе; Б – трехмерное отображение при приближенном масштабе)

Для определения базовых скоростных параметров были использованы результаты исследований О. С. Малютина и Р. Ш. Хабибулина, посвященных анализу скоростей движения пожарных автомобилей в зависимости от назначения дорог [5]. В указанных работах показано, что характер дорожного участка оказывает существенное влияние на фактическую скорость следования пожарного автомобиля, а использование единого значения средней скорости для

маршрутов различной структуры может приводить к снижению точности оценки времени прибытия.

В связи с этим в разрабатываемой имитационной среде для участков дорожной сети предусматривается использование различных базовых скоростей движения. При формировании маршрута учитывается последовательность дорожных сегментов, по которым перемещается транспортное средство, а продолжительность следования определяется исходя из длины и скоростной характеристики каждого из них.

В общем виде расчетное время прохождения маршрута может быть представлено выражением:

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V_i}$$

где: L_i – длина i -го участка маршрута;

V_i – базовая скорость движения на соответствующем участке дорожной сети.

В качестве исходных параметров при программной реализации использовались значения, полученные в исследованиях Малютина и Хабибулина для различных категорий дорог. При этом принципиальной особенностью разрабатываемой системы является возможность их последующего изменения пользователем. Таким образом, исходные скорости используются в качестве базовой конфигурации модели, но не являются жестко заданными константами. Это позволяет адаптировать имитационную среду к особенностям другой территории, иной структуре дорожной сети или результатам последующей калибровки по фактическим данным.

Вместе с тем тип дорожного участка является лишь одним из факторов, способных влиять на продолжительность следования. Архитектура разработанного комплекса предусматривает возможность дополнительной корректировки параметров движения в зависимости от характеристик транспортного средства и изменяющихся условий внешней среды. Подобная параметризация позволяет постепенно увеличивать детализацию имитационной модели без изменения ее базовой структуры.

В рамках работы разработан программный прототип геоинформационной имитационной среды для моделирования отдельных процессов функционирования экстренных служб на базе MapLibre. Реализованы трехмерное представление элементов городской среды, использование пользовательских моделей транспортных средств, построение маршрутов и имитация движения техники по дорожной сети с учетом базовых скоростных характеристик различных категорий дорог.

Разработанное решение рассматривается как основа для дальнейшего расширения функциональных возможностей и повышения детализации имитационной модели.

В дальнейшем планируется:

- уточнить транспортную модель с учетом дополнительных факторов движения;
- реализовать более детальный учет погодных и сезонных условий;
- расширить состав моделируемой техники и экстренных служб;
- повысить детализацию пространственной среды и объектов инфраструктуры;
- выполнить калибровку параметров модели по фактическим данным о выездах;
- развить механизмы проведения серийных вычислительных экспериментов;
- реализовать расширенный сбор и анализ статистических результатов;
- продолжить развитие клиент-серверной архитектуры и серверного расчетного ядра;
- расширить возможности загрузки пользовательских пространственных и трехмерных данных;
- обеспечить дальнейшее развитие комплекса как универсальной среды проведения геоинформационных имитационных экспериментов.

Список литературы

1. Малютин, О. С. Обзор подходов, методов и алгоритмов обоснования управленческих решений по снижению времени прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин //

- Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32, № 5. – С. 60-77. – DOI 10.22227/0869-7493.2023.32.05.60-77. – EDN KYKUYU.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025692005 Российская Федерация. Генезис (подготовка данных) : заявл. 19.11.2025 : опубл. 19.11.2025 / О. С. Малютин, В. В. Морозов, Г. Ю. Шамсудинов, А. Н. Батуро ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий. – EDN XWDPNA.
 3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668273 Российская Федерация. "Компьютерная имитационная система "КОСМАС" : № 2023666949 : заявл. 11.08.2023 : опубл. 24.08.2023 / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, Е. М. Алехин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий». – EDN ZTNPQU.
 4. Maplibre-RS: toward portable map renderers / M. Ammann, A. Drabble, J. Ingensand, B. Chapuis // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2022. – Vol. XLVIII-4/W1-2022. – P. 35-42. – DOI 10.5194/isprs-archives-xxlviii-4-w1-2022-35-2022. – EDN GTZFIJ.
 5. Малютин, О. С. Анализ скоростей движения пожарных автомобилей в зависимости от назначения дорог с использованием машинного обучения / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Материалы международной научно-технической конференции "Системы безопасности". – 2023. – № 32. – С. 44-50. – EDN IANXPQ.

СПИСОК ДОКЛАДОВ

Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИЕВОМ N-P ПЕРЕХОДЕ, ОБЛУЧЕННОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОТОНАМИ	3
С.А. Большаков, Д.В. Емельянов ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ И PLSR-МОДЕЛИРОВАНИЯ	9
Т. Б. Витова, Е. С. Кирик ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОЁМА НА ЛЕСТНИЧНУЮ КЛЕТКУ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭВАКУАЦИИ	15
Л.Р. Григорьян, Н.М. Богатов, Р.Л. Григорьян, М.С. Коваленко МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БУФЕРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ КЛЮЧЕВОГО СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ	22
А.В. Дергунов, К.В. Краснощеков, А.В. Токарев СОЗДАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО АРХИВА ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ERA5 ДЛЯ ЮГА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ	29
М.Г. Доррер, Д.С. Руденко ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУДОСТРОЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ	37
М.Г. Ерунова, А.К. Матузко, А.С. Кузнецова МУЛЬТИМАСШТАБНАЯ ТОПООСНОВА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АТМОСФЕРЫ КРАСНОЯРСКА	53
М.Г. Ерунова, А.К. Матузко ПОКВАРТАЛЬНАЯ КАРТА ЛОКАЛЬНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН	

КРАСНОЯРСКА ДЛЯ МОДЕЛИ WRF	61
В.В. Заворуев, Т.В. Якубайлик, О.Э. Якубайлик ВЫДЕЛЕНИЕ СЦЕНАРИЕВ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ Г. КРАСНОЯРСКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	69
Н.С. Изупов ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ И ЧС С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПРОВЕРКИ ТРЕВОЖНЫХ ГИПОТЕЗ	76
Е.Д. Каропова, Ю.В. Шанько ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЕМЕРА МТР-5 В Г. КРАСНОЯРСК	88
К.В. Краснощеков, В.Ю. Ромасько, А.В. Дергунов СОЗДАНИЕ АРХИВА КОНЦЕНТРАЦИЙ МГС ДЛЯ КРАСНОЯРСКА И ОКРЕСТНЫХ ТЕРРИТОРИЙ	98
М.И. Малимонов, А.А. Пушкарев ВЕБ-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ АТМОСФЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДАННЫХ МОНИТОРИНГА КРАСНОЯРСКА	104
М.И.Малимонов, А.А.Пушкарев ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ С МОДЕЛЬНЫМИ И НАБЛЮДАЕМЫМИ ДАННЫМИ АТМОСФЕРЫ КРАСНОЯРСКА	113
У.Д. Сигитова, Р.Н. Голых КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФОРМИРОВАННОЙ КАПЛИ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	120
С.А. Синюков, А.В. Шаповалов КВАЗИКЛАССИЧЕСКИЕ АСИМПТОТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ	

ОДНОМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ФИШЕРА-КПП С ФРАКТАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ПО ВРЕМЕНИ	125
В.Н. Удодов КРИТИЧЕСКИЕ ИНДЕКСЫ И ДИНАМИЧЕСКИЙ СКЕЙЛИНГ В РАМКАХ ПОДХОДА Л.Д. ЛАНДАУ К ТУРБУЛЕНТНОСТИ	131
Г.Ю. Шамсудинов РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКСТРЕННЫХ СЛУЖБ НА БАЗЕ MAPLIBRE	139

АЛФАВИТНЫЙ СПИСОК УЧАСТНИКОВ СЕМИНАРА

Участник	Адрес	Стр.
Богатов Николай Маркович	350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149 ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru	3, 22
Большаков Святослав Алексеевич	660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, Лаборатория. космических систем и технологий ФИЦ КНЦ СО РАН E-mail: bolshakov.sa@ksc.krasn.ru	9
Витова Татьяна Брониславовна	660036, г. Красноярск, Институт вычислительного моделирования СО РАН E-mail: vitova@icm.krasn.ru	15
Володин Владимир Сергеевич	350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149 ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» E-mail: volodinvs1995@mail.ru	3
Голых Роман Николаевич	659305, г. Бийск, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета E-mail: grn@bti.secna.ru	120
Григорьян Леонтий Рустемович	350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149 ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» E-mail: leonmezon@mail.ru	3, 22

Григорьян Рустем Леонтиевич	350072, г. Краснодар, Московская 81/1, ООО НПФ «Мезон» E-mail: mezon_kub@mail.ru	22
Дергунов Александр Владимирович	660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, Лаборатория. космических систем и технологий ФИЦ КНЦ СО РАН E-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru	29, 98
Доррер Михаил Георгиевич	660049, г. Красноярск, пр. Мира, д.82, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева E-mail: dorrer_mg@sibsau.ru	37
Емельянов Дмитрий Владимирович	660037, г. Красноярск, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» E-mail: dima9526@gmail.com	9
Ерунова Марина Геннадьевна	660036, Красноярск, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» E-mail: marina@icm.krasn.ru	53, 61
Заворуев Валерий Владимирович	660036, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44, ИВМ СО РАН E-mail: valzav@icm.krasn.ru	69
Изупов Никита Сергеевич	Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России E-mail: Ron1230@yandex.ru	76

Карепова Евгения Дмитриевна	660036, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44, Институт вычислительного моделирования СО РАН E-mail: e.d.karepova@icm.kras.ru	88
Кирик Екатерина Сергеевна	660036, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44, Институт вычислительного моделирования СО РАН E-mail: kirik@icm.kras.ru	15
Коваленко Максим Сергеевич	350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149 ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» E-mail: m.s.kovalenko@ya.ru	3, 22
Краснощеков Константин Вячеславович	660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, Лаборатория. космических систем и технологий ФИЦ КНЦ СО РАН E-mail: krasko@icm.krasn.ru	29, 98
Кузнецова Анна Сергеевна	660036, Красноярск, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» E-mail: anna.simakina.97@mail.ru	53
Матузко Александра Константиновна	660036, Красноярск, Институт вычислительного моделирования СО РАН E-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru	53, 61
Малимонов Максим Игоревич	660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, Лаборатория. космических систем и технологий ФИЦ КНЦ СО РАН E-mail: malimonov.mi@ksc.krasn.ru	103, 114

Пушкарев Александр Александрович	660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, Лаборатория космических систем и технологий ФИЦ КНЦ СО РАН E-mail: pushkarev@icm.krasn.ru	103, 114
Ромасько Виктор Юрьевич	660037, г. Красноярск, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» E-mail: rom@g-service.ru	98
Руденко Данила Сергеевич	660049, г. Красноярск, пр. Мира, д.82, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева E-mail: drudenko@transitsv.ru	37
Сигитова Ульяна Дмитриевна	659305, г. Бийск, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета E-mail: grn@bti.secna.ru	120
Синюков Сергей Александрович	634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет E-mail: ssaykmh@yandex.ru	125
Токарев Алексей Владимирович	660036, Красноярск, Институт вычислительного моделирования СО РАН E-mail: tav@icm.krasn.ru	29
Удодов Владимир Николаевич	655017, Абакан, пр. Ленина, д. 92/1, каб. 513, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова (ХГУ), E-mail: udodov@khsu.ru	131

Шамсудинов Глеб Юрьевич	662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1, ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» E-mail: gleb.shamsudinov@mail.ru	139
Шанько Юрий Вадимович	660036, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44, Институт вычислительного моделирования СО РАН E-mail: shanko@icm.krasn.ru	88
Шаповалов Александр Васильевич	634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет E-mail: shpv@mail.tsu.ru	125
Якубайлик Олег Эдуардович	660036, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44, ИВМ СО РАН E-mail: oleg@icm.krasn.ru	69
Якубайлик Татьяна Валерьевна	660036, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44, ИВМ СО РАН E-mail: ytv@icm.krasn.ru	69

Научное издание

**Моделирование неравновесных адаптивных и управляемых систем—
2026**

Материалы XXIX Всероссийского семинара 2 октября 2026 г.

Редактор О.Э. Якубайлик
Компьютерная верстка: М.Ю. Сенашова

Подписано в печать «4» сентября 2026 г. Формат 60 × 90/8. (А4)
Бумага офсетная. Печать плоская.
Усл. печ. л. 11,56. Уч.-изд. л. 10,81.
Тираж 50 экз. Заказ 14

Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
Тел/факс (391) 2907476
<http://icm.krasn.ru>

Отпечатано в типографии ИВМ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок