

***МНАУС***

***2025***

---

**МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НЕРАВНОВЕСНЫХ,  
АДАПТИВНЫХ И  
УПРАВЛЯЕМЫХ  
СИСТЕМ – 2025**

**Красноярск  
2025**

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-2025**

МАТЕРИАЛЫ  
ДВАДЦАТЬ ВОСЬМОГО ВСЕРОССИЙСКОГО СЕМИНАРА  
3 октября 2025 года

Красноярск 2025

УДК 001.126 (571.51) (043)

М 74

**Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем:**  
Материалы XXVIII Всероссийского семинара, / Под ред. О.Э. Якубайлика; отв.  
за вып. М.Ю. Сенашова; – Красноярск: Институт вычислительного  
моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, 2025. –123 с.

*В сборнике представлены материалы XXVIII Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем» (МНАУС–2025), проходившего в городе Красноярске 3 октября 2025 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 № 075-02-2025-1606).**

**Редакционная коллегия:**

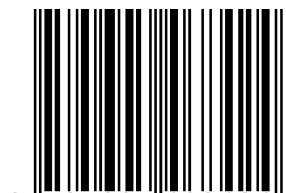
Якубайлик Олег Эдуардович – ответственный редактор

Сенашова Мария Юрьевна – ответственный за выпуск

© ИВМ СО РАН, 2025

© Коллектив авторов, 2025

ISBN 978-5-6054684-2-4



9 785605 468424 >

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА В КРЕМНИЕВОЙ *n-i-p* НАНОСТРУКТУРЕ

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

Кубанский государственный университет, *bogatov@phys.kubsu.ru*

Теория полупроводниковых приборов с *n-p*-переходами построена Шокли [1] для макроскопических структур. В расчетах используются два предельных случая: резкий *n-p*-переход, плавный *n-p*-переход с линейным распределением примесей [2, 3]. Для анализа структур с реальным распределением примесей разработаны численные модели [4, 5].

Выпрямляющие свойства *n-p*-перехода определяются электрическим потенциальным барьером и областью пространственного заряда (ОПЗ). Распределение электрического потенциала и плотности заряда в ОПЗ зависят от формы профиля концентрации ионизованных примесей и носителей заряда [6]. Расчет структур, содержащих сильно несимметричные, а также сверхмелкие *n-p*-переходы выполняется с помощью численных моделей [7, 8].

Уменьшение размеров полупроводниковых структур до наноразмерных масштабов является одной из тенденций современной электроники и оптоэлектроники. При этом возрастает вклад поверхности в свойства приборов. В работах [9 – 11] построен численный метод решения уравнения Пуассона в *n-p* переходе с учетом поверхностных состояний. В данной работе этот метод применяется для численного анализа кремниевой *n-i-p* наноструктуры.

Цель работы – анализ влияния поверхностных состояний на распределение носителей заряда в кремниевой *n-i-p* наноструктуре.

Условная схема *n-i-p* наноструктуры состоит из четырех частей (рис.1): 1 – диффузионный слой *n*-типа, расположенный при  $-w_n \leq x < 0$ , 2 – высокоомный слой  $p_0$ -типа (база), расположенный при  $0 \leq x < w_p$ , 3 – диффузионный слой *p*-типа, расположенный при  $w_p \leq x < w_{p2}$ , 4 – низкоомный слой *p*-типа, расположенный при  $w_{p2} \leq x \leq w_p + L$ ,  $L \gg w_n, w_p, w_{p2}$ .

Технологически высокоомный слой толщиной  $w_n + w_p + w_{p2}$  создается на

низкоомной подложке толщиной  $L - w_{p2}$ , легированной бором. Диффузия бора в область  $x < w_{p2}$ , происходит из подложки, а диффузия фосфора – из фосфорсодержащей композиции на противоположной поверхности при  $x < -w_n$ .

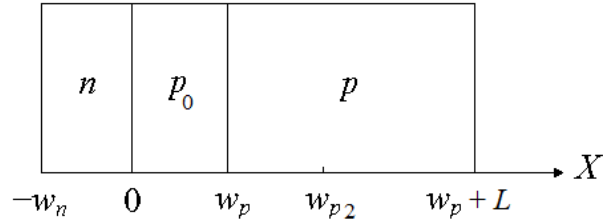


Рис.1. Условная схема  $n-i-p$  наноструктуры.

$$\text{Концентрация фосфора: } N_p(x) = N_{pp} \operatorname{erfc} \left( \frac{(x + w_n)}{x_{0p}} \right) \text{ при } -w_n \leq x, \quad (1)$$

$N_{pp}$  – концентрация фосфора на поверхности  $x = -w_n$ ,  $x_{0p}$  – характеристическая диффузионная длина фосфора. Концентрация бора в базе  $N_{B0} = \text{const}$ .

$$\text{Концентрация бора в } p\text{-слое: } N(x) = N_B(x) + N_{B0} \text{ при } w_p \leq x < w_{p2}, \quad (2)$$

$$N_B(x) = (N_{BB} - N_{B0}) \operatorname{erfc} \left( \frac{(w_{p2} - x)}{x_{0B}} \right), \quad (3)$$

$N_{BB}$  – концентрация бора на поверхности  $x = w_{p2}$ ,  $x_{0B}$  – характеристическая диффузионная длина бора. В подложке  $N(x) = N_{BB}$  при  $w_{p2} \leq x \leq w_p + L$ .

Концентрация ионизованных доноров и акцепторов

$$N_p^{\text{ion}}(x) = \frac{N_p(x)}{1 + g_p e^{\frac{F + q\phi(x) - E_g + E_p}{kT}}}, \quad N_B^{\text{ion}}(x) = \frac{N_B(x)}{1 + g_B e^{\frac{E_B - F - q\phi(x)}{kT}}}, \quad (4)$$

где  $F$  – электрохимический потенциал (уровень Ферми),  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $E_p$  – энергетический уровень примесного атома фосфора в запрещенной зоне,  $g_p$  – фактор вырождения этого уровня,  $E_B$  – энергетический уровень примесного атома бора в запрещенной зоне,  $g_B$  – фактор вырождения этого уровня,  $E_g$  – ширина запрещённой зоны,  $q$  – элементарный заряд,  $\phi(x)$  – потенциал внутреннего электрического поля. Металлургическая граница  $n-p$  перехода расположена при  $x = 0$ , где выполняется условие  $N^{\text{ion}}(0) = 0$ .

В поверхностной области толщиной  $w_s$  находятся заряженные электронные состояния [9]. Их объемная концентрация

$$N_s(x) = \begin{cases} \frac{N_{ss} kT}{w_s E_g} \ln \frac{\left(1 + e^{\frac{F + q\varphi(x) - \frac{E_g}{2}}{kT}}\right) \left(1 + e^{\frac{E_g - F - q\varphi(x)}{kT}}\right)}{\left(1 + e^{\frac{F + q\varphi(x)}{kT}}\right) \left(1 + e^{\frac{\frac{E_g}{2} - F - q\varphi(x)}{kT}}\right)}, & \text{при } -w_n \leq x < (w_s - w_n), \\ 0, & \text{при } (w_s - w_n) \leq x \leq w_p + L \end{cases}, \quad (5)$$

где  $N_{ss}$  – плотность поверхностных состояний в запрещённой зоне.

Концентрации электронов  $n(x)$ , дырок  $p(x)$ :

$$n(x) = N_c e^{\frac{F - E_g + q\varphi(x)}{kT}}, \quad p(x) = N_v e^{\frac{-F - q\varphi(x)}{kT}}, \quad (6)$$

где  $N_c$  – эффективная плотность электронных состояний в окрестности дна зоны проводимости,  $N_v$  – эффективная плотность электронных состояний в окрестности вершины валентной зоны. Энергия отсчитывается от вершины валентной зоны в точке  $x = w_p + L$ .

Потенциал внутреннего электрического поля является решением уравнения Пуассона:

$$\frac{d^2}{dx^2} \varphi(x) = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)), \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $N^{ion}(x)$  – суммарная концентрация ионизованных доноров и акцепторов.

Дополнительным условием для уравнения (7) является условие общей электронейтральности:

$$\int_{-w_n}^{w_p + L} (p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)) dx = 0. \quad (8)$$

Из уравнения (7) и условия (8) следует, что

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=-w_n} = \left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=w_p + L} = 0, \quad (9)$$

так как напряженность электрического поля равна нулю вне структуры. Выбор начала отсчета потенциала произволен, поэтому  $\varphi(w_p + L) = 0$ . Из (9) следует, что  $\varphi(x) = \varphi_0$  при  $x \leq -w_n$ . Константа  $\varphi_0$  явно не задается, а определяется в итерационном процессе.

Уравнение (7) в разностной форме решалось численно. Расчёты проводились для кремниевой структуры с наноразмерными слоями одинаковой толщины  $w_n = w_p = w_{p2}/2 = w$ , толщиной поверхностного слоя  $w_s = 1$  нм при температуре 300 К. Концентрация фосфора на поверхности  $N_{PP} = 10^{26} \text{ м}^{-3}$ , бора в базе  $N_{B0} = 10^{17} \text{ м}^{-3}$ , бора в подложке  $N_{BB} = 10^{26} \text{ м}^{-3}$ . При этих значениях  $N_p^{ion}(x) < N_c$ ,  $|N_B^{ion}(x)| < N_v$  для всех  $-w_n \leq x \leq w_p + L$ , так что электронный и дырочный газ является невырожденным. Размеры слоев наноструктуры  $w_n = w_p = \Delta w_p = 20$  нм выбраны так, что квантовыми эффектами можно пренебречь.

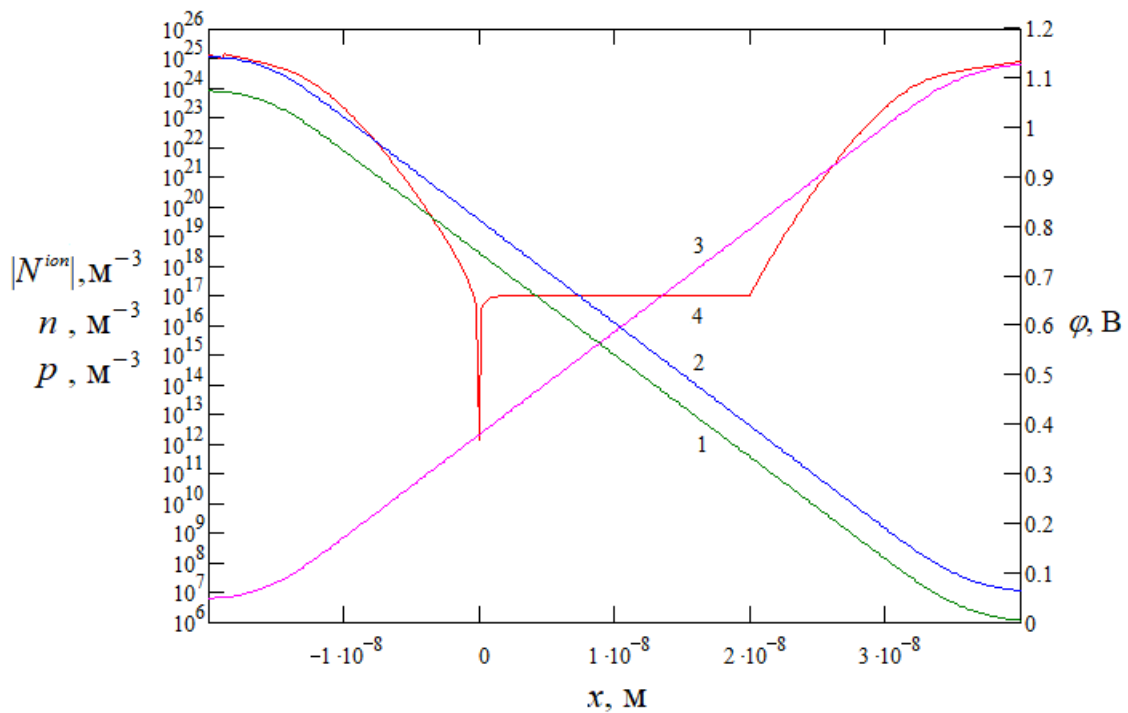


Рис. 1. Изменение 1 –  $\varphi(x)$ , 2 –  $n(x)$ , 3 –  $p(x)$ , 4 –  $|N^{ion}(x)|$  в объёме наноразмерной  $n$ - $i$ - $p$  структуры при  $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$

На рис. 1 показано распределение электрического потенциала и концентрации заряженных частиц при  $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ . Концентрация ионизованных примесей взята по модулю, так как  $N^{ion}(x) < 0$  при  $x > 0$ .

Поверхностный потенциальный барьер пренебрежимо мал. Область положительного заряда, созданного ионизованными донорами, расположена при  $-w_n < x < -8$  нм, область отрицательного заряда, созданного ионизованными акцепторами, расположена при  $26.4$  нм  $< x < 40$  нм. Эти области создают электрическое поле в объёме с напряжённостью  $E_0$  (аналог плоскопараллельного конденсатора). Между ними находятся три области: 1 – обогащённая электронами при  $-8$  нм  $< x < 7.2$  нм, 2 – обеднённая носителями заряда при  $7.2$  нм  $< x < 13.6$  нм, 3 – обогащённая дырками при  $13.6$  нм  $< x < 26.4$  нм. Последние три области обуславливают малое отклонение напряжённости  $\Delta E(x)$  от  $E_0$ .

Плотность поверхностных состояний  $N_{ss} = 10^{17} \text{ м}^{-2}$  на рис. 2 и  $N_{ss} = 10^{18} \text{ м}^{-2}$  на рис. 3. В обоих случаях  $N^{ion}(x) + N_s(x) < 0$  при  $x < -1.9 \cdot 10^{-8} \text{ м}$  в поверхностном слое толщиной  $w_s = 1$  нм.

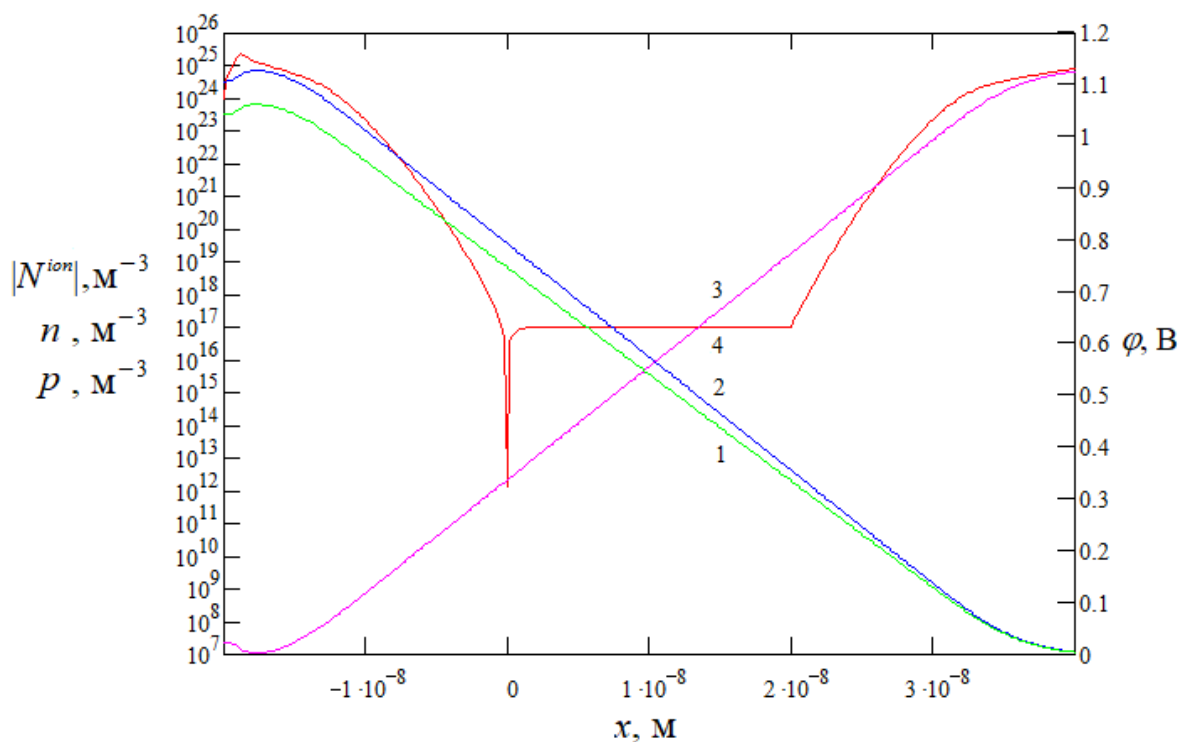


Рис. 2. Изменение 1 –  $\varphi(x)$ , 2 –  $n(x)$ , 3 –  $p(x)$ , 4 –  $|N^{ion}(x)|$  в объёме наноразмерной  $n$ - $i$ - $p$  структуры при  $N_{ss} = 10^{17} \text{ м}^{-2}$

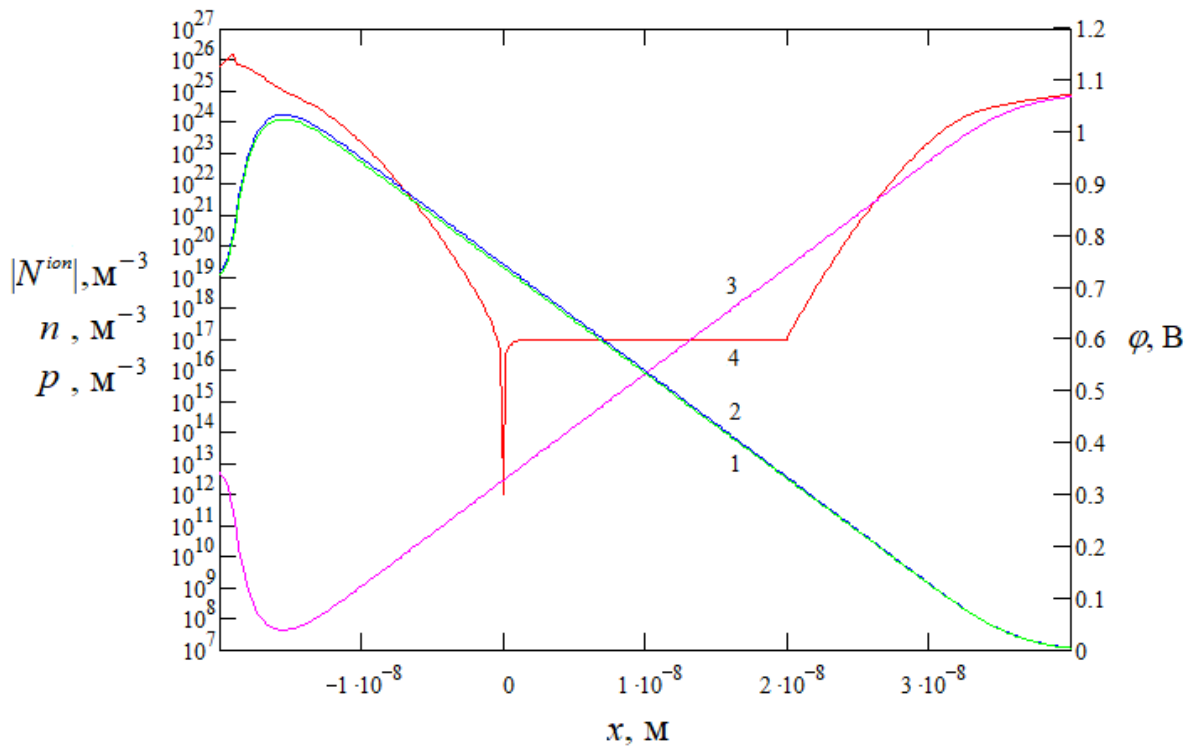


Рис. 3. Изменение 1 –  $\varphi(x)$ , 2 –  $n(x)$ , 3 –  $p(x)$ , 4 –  $|N^{ion}(x)|$  в объёме наноразмерной  $n$ - $i$ - $p$  структуры при  $N_{ss} = 10^{18} \text{ м}^{-2}$

Изменение плотности заряженных частиц  $Q$  в поверхностной области проиллюстрировано на рис. 4. В полупроводнике  $n$ -типа поверхностный заряд отрицательный, он экранируется положительным зарядом лоноров. Увеличение  $N_{ss}$  приводит к уменьшению электрического потенциального барьера  $\Delta\varphi = \varphi(-w_n) - \varphi(w_p + L)$   $n$ - $i$ - $p$  структуры и концентрации носителей заряда в поверхностной области (рис. 1 – рис. 3). Значения электрического потенциального барьера:  $\Delta\varphi = 1.0737 \text{ В}$  при  $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ,  $\Delta\varphi = 1.0414 \text{ В}$  при  $N_{ss} = 10^{17} \text{ м}^{-2}$ ,  $\Delta\varphi = 0.7343 \text{ В}$  при  $N_{ss} = 10^{18} \text{ м}^{-2}$ .

В значение плотности поверхностных состояний, расположенных в зоне запрещённых энергий, дают вклад таммовские состояния, уровни Шокли, уровни, созданные дефектами решетки, примесями и др. Теоретические оценки и экспериментальные данные показывают, что в кремнии плотность поверхностных состояний находится в диапазоне  $10^{15} \div 10^{19} \text{ м}^{-2}$  [12, 13]. Нарушенный поверхностный слой – более широкое понятие, включающее кроме поверхностных состояний область, содержащую механические дефекты.

Современные технологические методы обработки поверхности позволяют минимизировать нарушенный слой так, что остаются только поверхностные дефекты в слое толщиной 1 – 2 нм [14, 15].

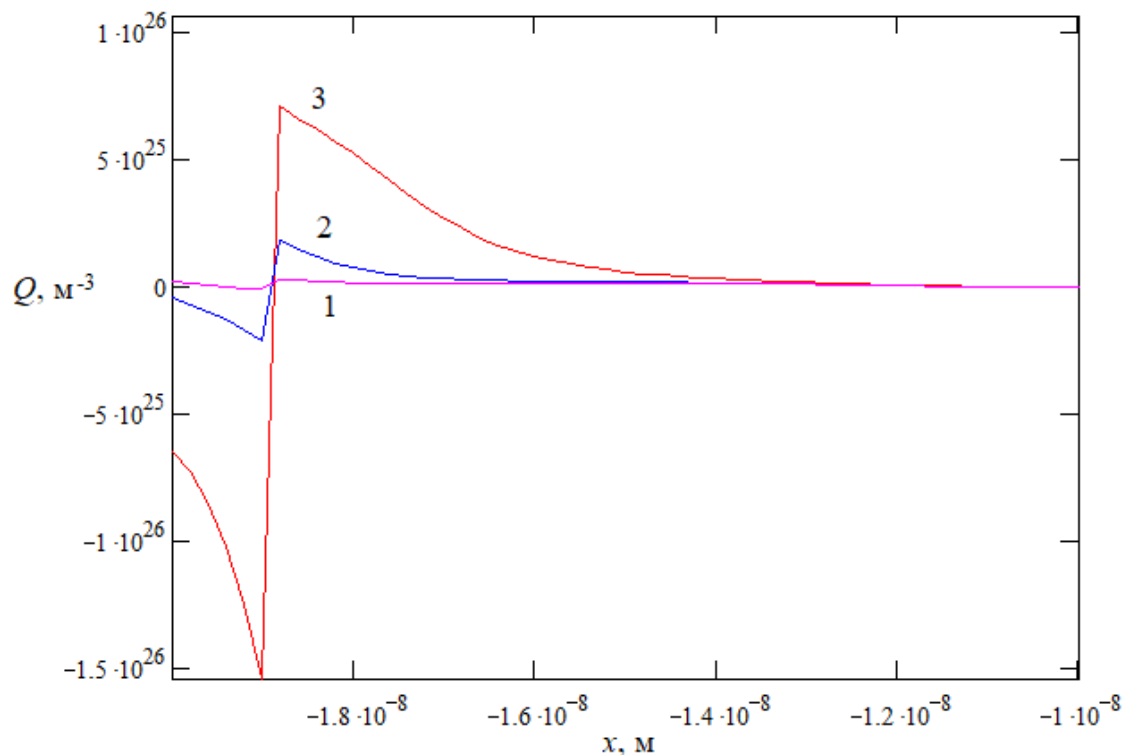


Рис. 4. Изменение плотности заряженных частиц в поверхностной области 1 –  $N_{ss} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ , 2 –  $N_{ss} = 10^{17} \text{ м}^{-2}$ , 3 –  $N_{ss} = 10^{18} \text{ м}^{-2}$

Полученные результаты показывают, что поверхностные состояния не влияют на распределение носителей заряда и электрический потенциальный барьер в кремниевой  $n-i-p$  наноструктуре при  $N_{ss} \leq 10^{16} \text{ м}^{-2}$ . Плотность поверхностных состояний уменьшают технологически за счет пассивации поверхности пленкой диэлектрика [16].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shockley W. The theory of  $n-p$  junctions in semiconductors and  $n-p$  junction transistors / W. Shockley // Bell Syst. Tech. J. — 1949. — V.28. — N 7. P. 435 – 439.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1 / С. Зи. — М.: Мир, 1984. — 456 с.

3. Pulfrey D.L. Understanding Modern Transistors and Diodes / D.L. Pulfrey. — Cambridge University Press, 2010. — 335 p.
4. Redfield D. Revised model of asymmetric  $n$ - $p$  junctions / D. Redfield // Applied Physics Letters. — 1979. — V.35. — July 15. P. 182 – 184.
5. Pfitzner A. Numerical solution of the one - dimensional phenomenological transport equation set in semiconductors / A. Pfitzner // Electron Technology. — 1977. — V.10. — N 4. P. 3 – 21.
6. Богатов Н.М. Моделирование распределения заряда в несимметричном  $n$ - $p$ -переходе / Н.М. Богатов // Моделирование неравновесных систем: Материалы XIX Всероссийского семинара, 7 – 9 октября 2016 г. Красноярск. Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН. — 2016. С. 10 – 14.
7. Богатов Н.М. Анализ влияния легирующих примесей на эффективность солнечных элементов из монокристаллического кремния / Н.М. Богатов // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. — 1991. — В. 6(260). С. 48 – 53.
8. Богатов Н.М. Анализ влияния рекомбинации в области пространственного заряда на вольт-амперную характеристику кремниевых солнечных элементов / Н.М. Богатов // Гелиотехника. — 1990. — № 6. С. 49 – 53.
9. Богатов Н.М. Численное решение уравнения Пуассона в  $n$ - $p$  переходе с учетом поверхностных состояний / Н.М. Богатов // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2024. – Т. 21. – № 3. – С. 61 – 69.
10. Богатов Н.М. Расчет изменения концентрации заряженных частиц в поверхностной области  $n$ - $p$  перехода на основе численного решения уравнения Пуассона / Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко // Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем: Материалы XXVII Всероссийского семинара, 4 октября 2024 г. Красноярск. Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2024. С. 13 – 21.

11. Богатов Н.М. Влияние поверхностных состояний на электрическое поле *n-p* перехода / Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко // Известия ЮФУ. — Технические науки. — 2024. — № 3. — С. 266 – 275.
12. Яфаров Р.К. Влияние встроенного поверхностного потенциала на ВАХ кремниевых МДП структур / Р.К. Яфаров // Микроэлектроника. — 2019. — Т. 48. — № 2. — С. 155 – 159.
13. Александров О.В. Влияние интенсивности ионизирующего облучения на отклик МОП-структур / О.В. Александров // Физика и техника полупроводников. — 2021. — Т. 55. — В. 2. — С. 152 – 158.
14. Волковский Ю.А. Исследование состояния приповерхностного слоя полированных кремниевых подложек методом рентгеновской рефлектометрии в зависимости от методов их очистки / Ю.А. Волковский, А.Ю. Серегин, М.С. Фоломешкин и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2021. — № 9. — С. 40 – 48.
15. Юров В.М., Жанабергенов Т., Гученко С.А. Толщина поверхностного слоя типичных полупроводников / В.М. Юров, Т. Жанабергенов, С.А. Гученко // The scientific heritage. — 2020. — № 43. — С. 20 – 23.
16. Savin H. Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency / H. Savin, P. Repo, G. von Gastrow, et al. // Nat Nanotechnol. — 2015. — V. 10(7). — 624-8. — P. 1 – 12.

# АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО ИНДЕКСА ПИ1 К ВАРИАЦИЯМ УСЛОВИЙ СЪЁМКИ ДЛЯ ЗАДАЧ ПОЧВЕННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

С.А. Большаков<sup>1</sup>, Ю.Н. Трубников<sup>1</sup>, А.В. Дергунов<sup>1</sup>, К.В. Краснощеков<sup>1</sup>,

О.Э. Якубайлик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук», [sklayd14@gmail.com](mailto:sklayd14@gmail.com)

Современные технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предоставляют эффективный инструментарий для дешифровки почвенного покрова и предварительного выделения основных типов и подтипов почв. В качестве ключевых инструментов для такого анализа выступают специальные спектральные индексы, которые представляют собой математические комбинации данных, получаемых из каналов мультиспектральной съемки. Эти данные отражают спектральную яркость (отражательную способность) объектов земной поверхности в различных диапазонах электромагнитного спектра [1, 2, 3].

Среди множества разработанных индексов можно выделить несколько широко используемых для спектрометрии почв:

- MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index): метод минимизирует влияние открытой почвы [4. 5].

$$MSAVI2 = (1/2) * (2(NIR+1) - \sqrt{(2*NIR+1)^2 - 8(NIR - Red)})$$

где NIR – значения пикселей в ближнем инфракрасном диапазоне, Red - значения в красном диапазоне.

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): стандартизированный индекс, позволяющий визуализировать зеленую биомассу. Значения варьируются от -1.0 до 1.0. [5].

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red)$$

- SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index): индекс минимизирует влияние яркости почвы с помощью поправочного коэффициента (L) и часто применяется в аридных регионах. Значения от -1.0 до 1.0 [6].

$$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) * (1 + L)$$

- TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index): метод минимизирует влияние почвы, предполагая, что линия почвы имеет произвольные наклон и сдвиг [7].

$$TSAVI = (s * (NIR - s * Red - a)) / (a * NIR + Red - a * s + X * (1 + s^2))$$

где  $s$  – наклон линии почвы,  $a$  – сдвиг линии почвы,  $X$  – поправочный коэффициент.

Объектом исследования послужили образцы основных генетических типов почв, отобранные в пределах сельскохозяйственных угодий. В исследовании были представлены следующие почвы: 1 – песок, 2 – светло-серая лесная, 3 – чернозем оподзоленный (Казаченский ГСУ), 4 – серая лесная, 5 – чернозем южный (Бейский ГСУ), 6 – чернозем обыкновенный (Михайловское ОПХ), 7 – чернозем выщелоченный (Уярский ГСУ). Для выполнения спектрометрических измерений образцы были размещены на контрольном полигоне линейной последовательностью в виде прямоугольных площадок размером 1×1 м каждая.

Съемка объектов осуществлялась с использованием мультиспектральной камеры RedEdge, установленной на беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Эксперимент проводился в два этапа с целью оценки влияния влажности почвы на ее спектральные свойства. На первом этапе проводилась съемка образцов в естественном сухом состоянии с высот 30, 40 и 120 метров. На втором этапе выполнялась съемка тех же образцов после искусственного увлажнения с высот 5, 10, 30, 40 и 120 метров.

Для решения поставленной задачи в данном исследовании был использован специализированный почвенный индекс ПИ1, предложенный Украинским П.А. [4] на основе методических принципов дешифровки, разработанных Королюком Т.В. и Щербенко Е.В. [5].

Данный индекс вычисляется по материалам мультиспектральной съемки по следующей формуле:

$$ПИ1 = (Green - Nir) / (Green + Nir - 2 \times Red)$$



Рис. 1. – Спектральный снимок тестового полигона с увлажненными почвенными образцами, полученный с высоты 5 м.

Полученные мультиспектральные снимки были подвергнуты радиометрической калибровке. Последующая обработка данных проводилась в среде геоинформационной системы QGIS. Для выделения целевых объектов на изображении было выполнено маскирование территории полигона, что позволило исключить фоновые участки из анализа.

На выделенных участках проведен расчет значений почвенного индекса ПИ1 с формированием соответствующего растрового слоя. Распределение индекса ПИ1 было визуализировано с использованием цветовой шкалы, что обеспечило интерпретацию пространственной неоднородности почвенного покрова на основе его спектральных характеристик.



Рис. 2 – Градиентное растровое изображение распределения индекса ПИ1 на почвенных участках на высоте 5м.

Статистический анализ данных проводился с построением диаграмм размаха (boxplot) в программе Excel. Результаты анализа показали четкую дифференциацию почвенных типов по величинам индекса ПИ1. Наибольший разброс значений характерен для песчаных и светло-серых лесных почв, в то

время как черноземы и серая лесная почва отличаются существенно меньшей вариабельностью показателя.

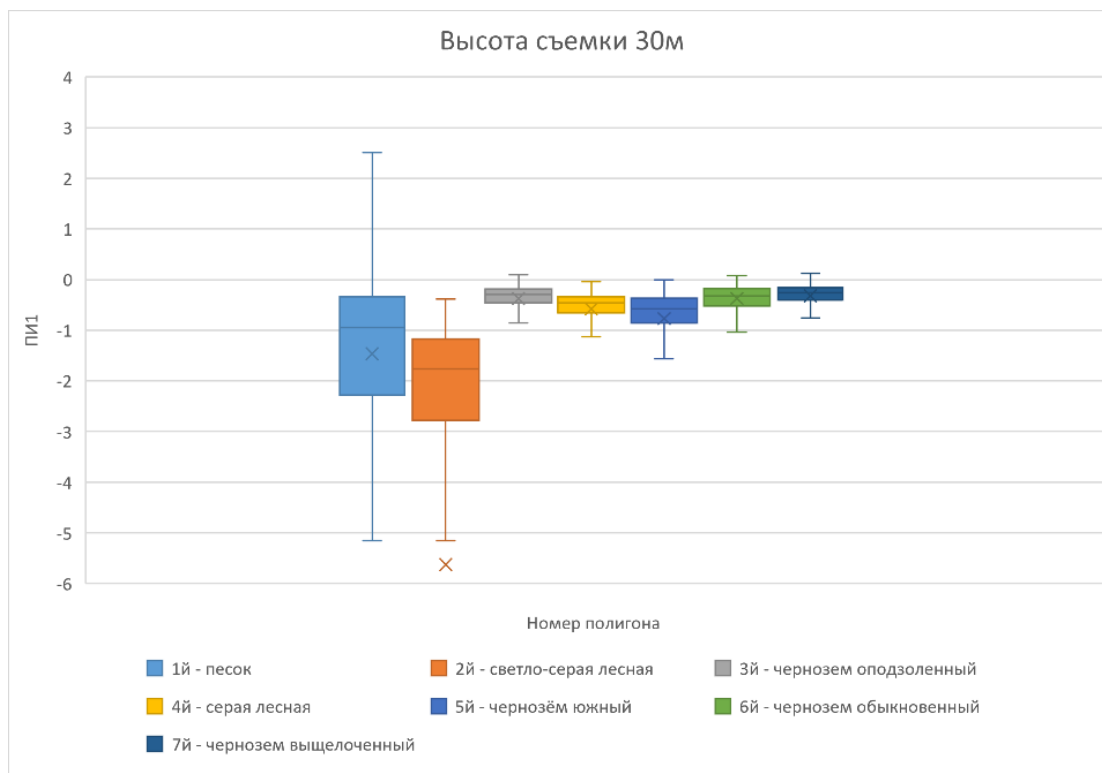


Рис. 3. – Графики значений ПИ1 для разных типов сухой почвы на высоте 30 м.

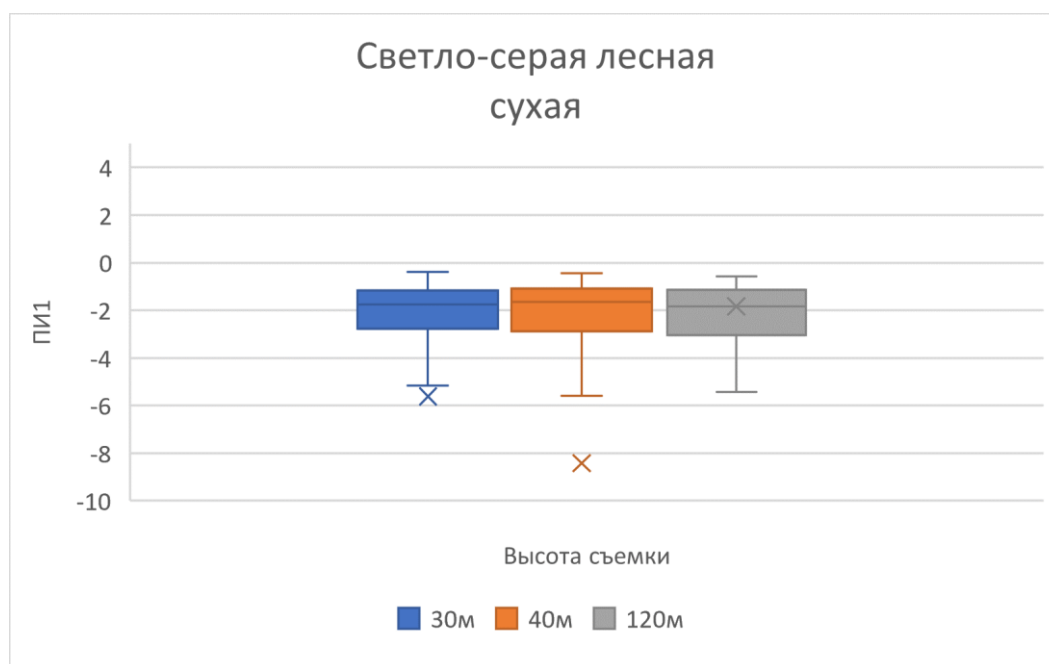


Рис. 4. – График значений ПИ1 для сухой светло-серой лесной почвы.

Выявлена четкая зависимость значений ПИ1 от высоты съемки для песчаных и светло-серых лесных почв: с ее увеличением показатели индекса для песка возрастают, а для светло-серой лесной почвы – снижаются до отрицательных значений. Черноземы и серая лесная почва, напротив, характеризуются стабильностью индекса независимо от высоты.

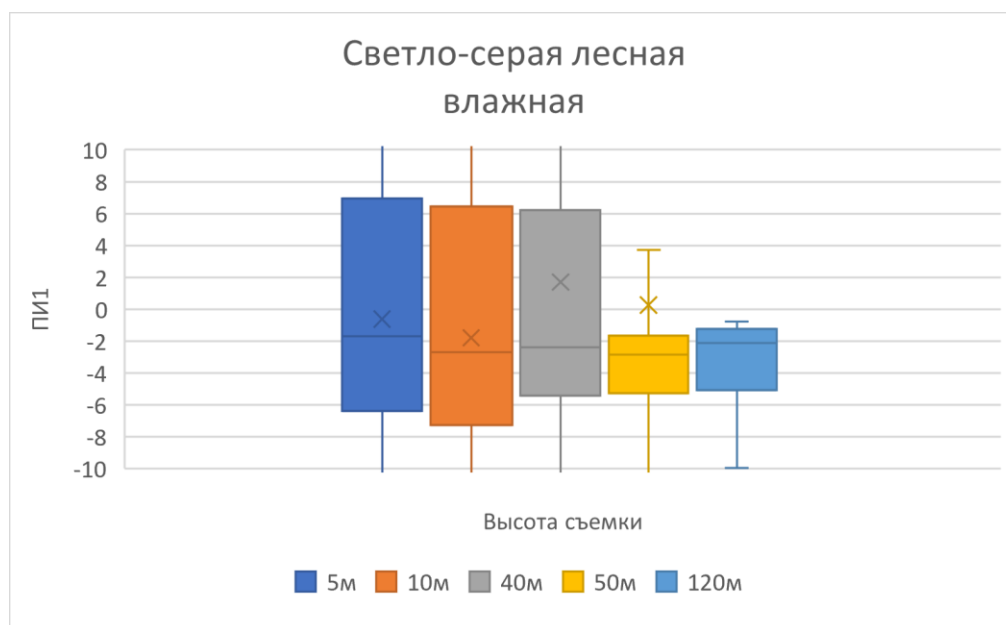


Рис. 5. – График значений ПИ1 для влажной светло-серой лесной почвы.

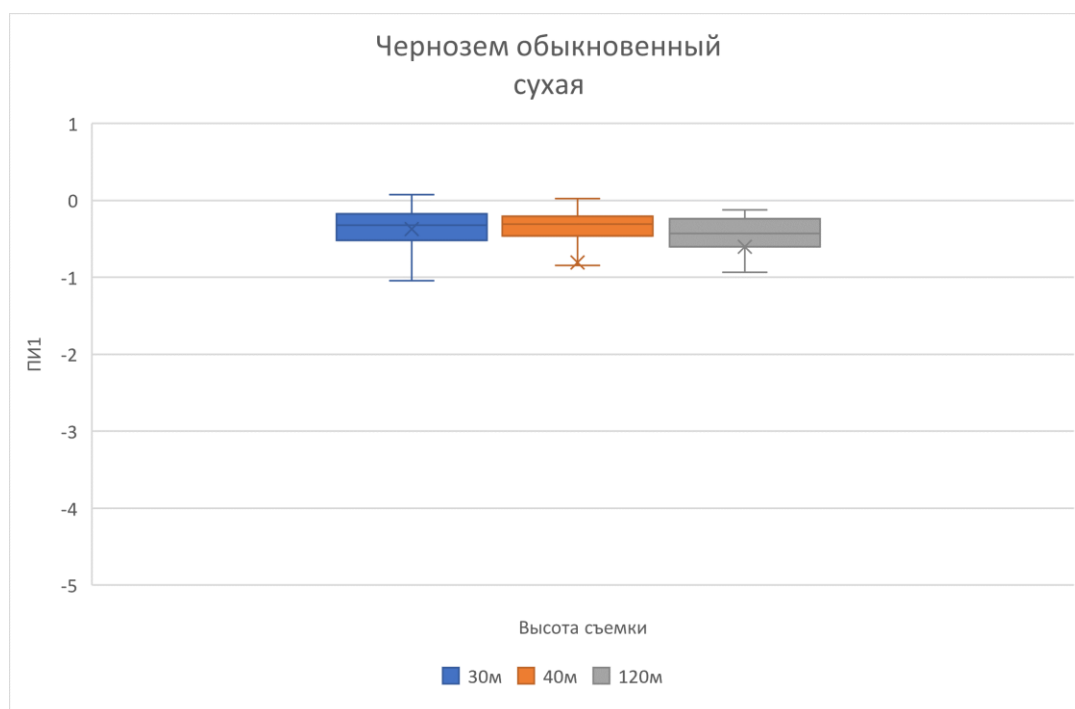


Рис. 6. – Графики значений ПИ1 для сухого и чернозема обыкновенного.

Влияние влажности на спектральные характеристики также имеет дифференцированный характер в зависимости от типа почвы. Увлажнение приводит к значительному увеличению вариабельности значений индекса ПИ1 в случае песчаных и светло-серых лесных почв. Для черноземов и серой лесной почвы изменение влажности оказывает слабовыраженное воздействие, вызывая колебания показателей в пределах десятых долей с тенденцией к незначительному уменьшению размаха значений.

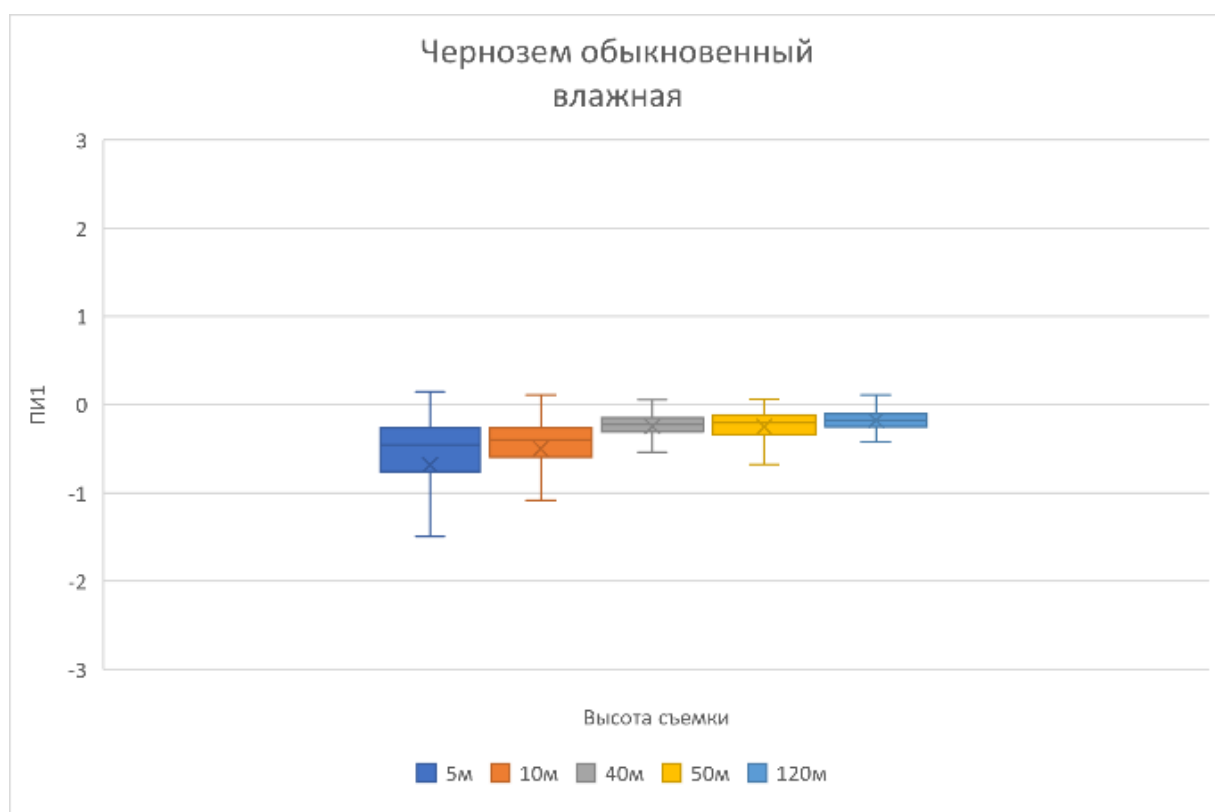


Рис. 7. – Графики значений ПИ1 для влажного и чернозема обыкновенного.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караванова Е.И. Оптические свойства почв и их природа [Учеб. пособие] / Е.И. Караванова М. : Изд-во Моск. ун-та, 2003. — 151 с. ил.; 21.
2. Караванова Е.И., Кириллова Н.И. Отражательная способность и цвет почв: учебное пособие / Н. П. Кириллова, Е. И. Караванова. Москва : Русайнс, 2024. - 198 с.

3. Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019, №5 с. 517-528.
4. Qi, J. et al., 1994, "A modified soil vegetation adjusted index," Remote Sensing of Environment, Vol. 48, No. 2, 119–126
5. М.А. Павлова, В.А. Тимофеев, Д.А. Бочаров, Д.С. Сидорчук, А.Л. Нурмухаметов, А.В. Никоноров, М.С. Ярыкина, И.А. Кунина, А.А. Смагина, М.А. Загарев Малопараметрический метод оконтуривания сельскохозяйственных полей на спутниковых снимках с помощью исторических данных MSAVI2 // Компьютерная оптика, 2023, том 47, №3 с. 451-463
6. Баширова, Ч. Ф. Индекс NDVI для дистанционного мониторинга растительности / Ч. Ф. Баширова. // Молодой ученый. - 2019. - № 31 (269). - с. 30-31.
7. Huete, A. R., 1988, "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)," Remote Sensing of Environment, Vol 25, 295–309
8. Украинский П. А. Оценка земель сельскохозяйственного назначения по показателям плодородия для дистанционного мониторинга (на примере белгородской области): автореф. дис. на соискание ученой степени кан-та географ. наук. Белгород ФГАОУ ВПО, 2011. 23с.
9. Королюк Т.В., Щербенко Е.В. Распознавание почвенного покрова лесостепных ландшафтов по материалам разносезонной многозональной съемки // Почвоведение, 2003, №3, с. 275-288.

# ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ ЧЕРЕЗ ВИДЕОАНАЛИТИКУ

Е. А. Ващенко, М. Г. Доррер

Сибирский государственный университет науки и технологий имени  
академика М. Ф. Решетнева, [vaschenkoeva@yandex.ru](mailto:vaschenkoeva@yandex.ru)

Современные розничные предприятия сталкиваются с необходимостью эффективного мониторинга и анализа бизнес-процессов, чтобы улучшать обслуживание клиентов, оптимизировать рабочие потоки и снижать издержки. Традиционные методы документирования бизнес-процессов часто основываются на ручном наблюдении, опросах персонала или анализе логов ИТ-систем, что ограничивает полноту и точность данных. В последние годы наблюдается стремительное развитие видеонаблюдения и компьютерного зрения, которые позволяют фиксировать реальные действия сотрудников и клиентов в реальном времени. Интеграция этих технологий с Process Mining открывает новые возможности для автоматизации восстановления событий, построения протоколов действий и моделирования бизнес-процессов без значительного вмешательства человека.

Актуальность подхода объясняется несколькими факторами:

1. Рост объемов видеоданных в розничной торговле и развитие систем видеоаналитики создают возможность извлекать структурированную информацию из непрерывных потоков изображений;
2. Использование компьютерного зрения позволяет фиксировать детали действий, которые не отражены в стандартных логах ИТ-система, повышая точность анализа процессов;
3. Комбинация видеоаналитики с Process Mining способствует автоматизации построения моделей процессов и выявлению узких мест, что важно для повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий.

Таким образом, создание методов и инструментов для документирования процессов розничной торговли через видеоаналитику становится актуальной и

востребованной задачей, обеспечивая возможности для автоматизации, повышения прозрачности и анализа процессов в реальном времени.

Современные исследования демонстрируют, что интеграция Process Mining и компьютерного зрения открывает новые возможности для документирования и анализа бизнес-процессов. Pasqua Di Bisceglie и соавторы предложили подход предсказательной аналитики процессов, в котором RGB-представления действий анализируются с помощью сверточных нейронных сетей, что позволяет повысить точность прогнозирования событий бизнес-процессов за счет визуальной информации [1]. Kraus и Van der Aa разработали метод обнаружения концептуальных изменений в процессах concept drift на основе анализа видеопотоков, что обеспечивает своевременное выявление изменений и позволяет адаптировать процессы без потери эффективности [2]. Zhang и Niiranen интегрировали методы компьютерного зрения с численным моделированием, что дает возможность автоматически строить процессные модели и повышает точность прогнозов и анализа, особенно в динамично изменяющихся средах [3]. Miksch и соавторы в рамках исследований визуальной аналитики показали, что использование компьютерного зрения в Process Mining позволяет извлекать сложные события и выявлять скрытые закономерности, что способствует более глубокому пониманию процессов и выявлению узких мест [4]. Практическую значимость направления демонстрирует работа Kratsch и коллег, которые предложили референсную архитектуру для применения видеоданных в Process Mining, что открывает перспективы систематизации и автоматизации анализа бизнес-процессов [5].

В целом, проанализированные исследования подтверждают, что объединение видеоаналитики и Process Mining позволяет создавать более полные и точные протоколы событий, автоматически восстанавливать модели процессов и открывать новые возможности для анализа и оптимизации бизнес-процессов, особенно в условиях розничной торговли.

Для восстановления и моделирования бизнес-процессов использовалось видео работы кафе, на котором фиксировалась деятельность сотрудников и

клиентов. Видео служило исходным источником данных для анализа последовательности действия и построения модели процесса.

Восстановление событий осуществлялось путем покадрового анализа. Каждый ключевой момент, соответствующий началу или завершению действия фиксировался с указанием таймкода. Для ускорения процесса использовались инструменты компьютерного зрения, позволяющие автоматически детектировать движения и действия.

Формирование event log представляло собой структурирование извлеченных данных в виде таблицы с полями: «Время начала», «Время конца», «Действие», «Исполнитель». Такой лог событий служил основой для дальнейшего анализа и построения модели процесса. Пример event log приведен в таблице 1.

Для восстановления событий и построения модели процесса использовался язык Python, который предоставляет широкий набор инструментов для анализа данных и компьютерного зрения. В частности, применялись следующие библиотеки:

- OpenCV – для покадрового анализа видео и выделения ключевых действий;
- Pandas – для формирования протокола событий (event log) в табличной форме;
- Graphviz – для построения диаграмм бизнес-процессов в формате, близком к BPMN.

Для автоматизации анализа видео могут применяться модели компьютерного зрения:

- сверточные нейронные сети для классификации действий в кадрах;
- специализированные архитектуры для распознавания действий во временных последовательностях, позволяющие учитывать динамику движений и точнее определять начало и завершение операций.

В рамках исследования была реализована последовательность шагов, приведенная в блок-схеме.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма восстановления событий и построения модели процесса.

Таблица 1  
Event log

| Время<br>начала | Время конца | Действие      | Исполнитель |
|-----------------|-------------|---------------|-------------|
| 00:00           | 00:11       | Выдача заказа | Работник 1  |
| 00:20           | 00:25       | Оплата заказа | Кассир      |

|       |       |                     |        |
|-------|-------|---------------------|--------|
| 00:20 | 00:25 | Оплата              | Клиент |
| 00:24 | --    | Потребление<br>пищи | Клиент |

Модель процесса строилась на основе event log, что позволило визуализировать последовательность действий и развилки процесса, а также проверить корректность логики в соответствии с событиями, зафиксированными в видео.

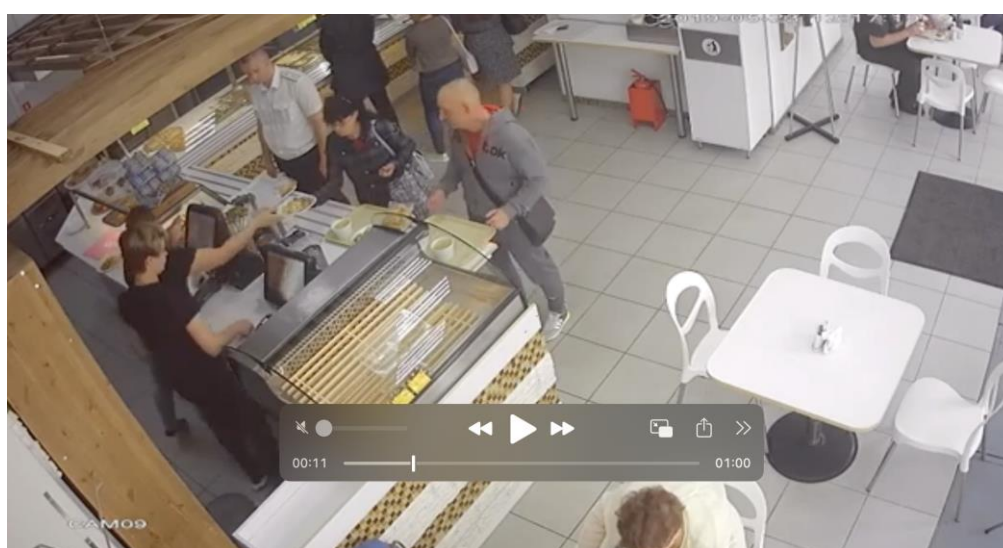


Рис. 2. Выдача заказа.

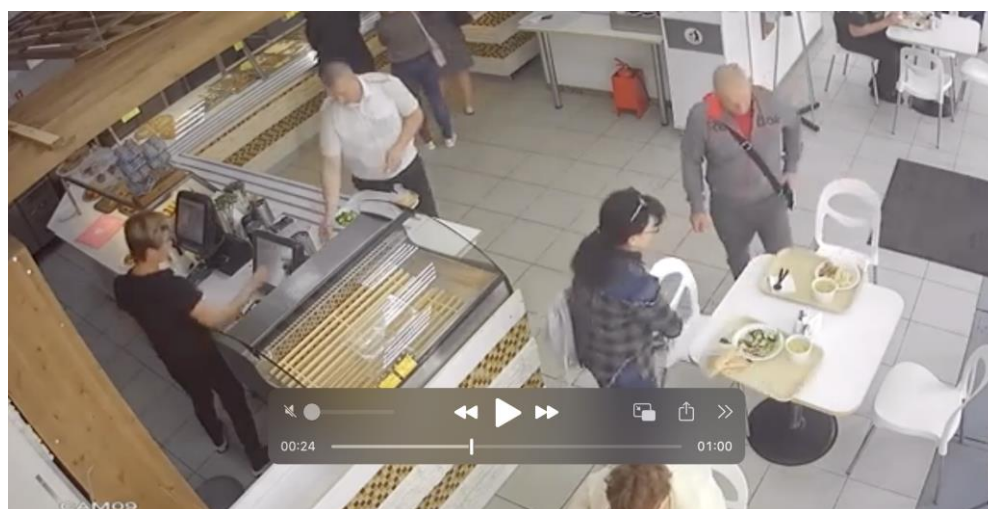


Рис. 3. Оплата заказа

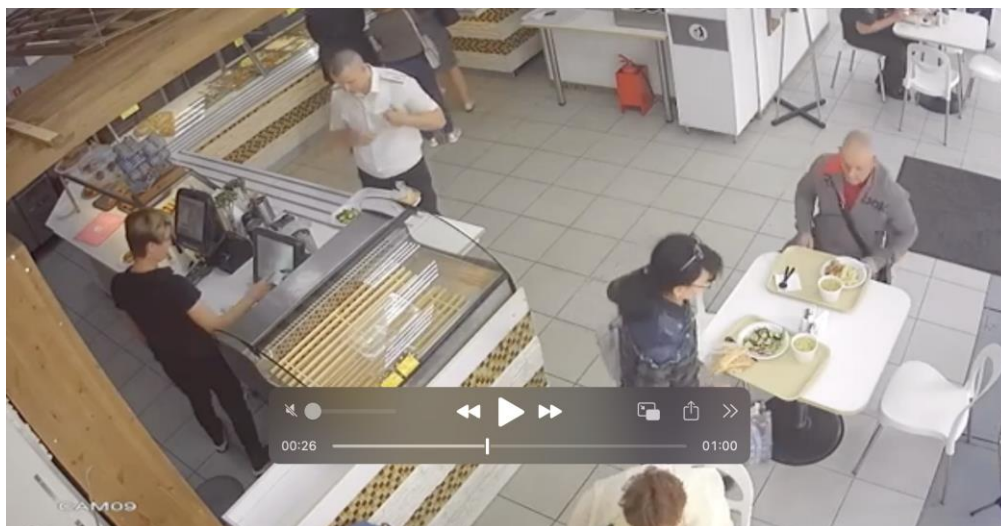


Рис. 4. Потребление пищи

На рисунках 2-4 представлены фрагменты видео, на которых зафиксированы ключевые действия клиентов и сотрудников. Скриншоты иллюстрируют соответствие временных меток в event log реальным событиям на линии обслуживания.

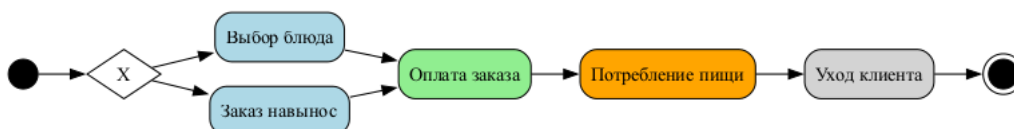


Рис. 5. BPMN-диаграмма.

На рисунке 5 показана восстановленная BPMN-диаграмма процесса, построенная на основе event log. Модель наглядно демонстрирует последовательность действий, точки развилки и взаимосвязь между событиями, что позволяет наглядно оценить логику и структуру бизнес-процесса в кафе.

В результате работы был восстановлен и визуализирован бизнес-процесс кафе на основе видео и event log, что подтвердило корректность последовательности действий. Практическая значимость заключается в повышении прозрачности операций. В перспективе можно автоматизировать извлечение событий из видео и использовать готовые модели для оптимизации и улучшения бизнес-процессов. Таким образом, продемонстрированная методика

может служить основой для дальнейшей автоматизации бизнес-процессов в розничной торговле и повышения эффективности работы предприятий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pasqua Di Bisceglie V. Predictive Process Mining Meets Computer Vision / V. Pasqua Di Bisceglie, A. Appice, G. Castellano, D. Malerba // Business Process Management Forum (BPM Forum 2020): Proc. – Cham: Springer, Lecture Notes in Business Information Processing, 2020. – p. 176-192.
2. Kraus A. Looking for change: A computer Vision Approach for Concept Drift Detection in Process Mining / A. Kraus, Han van der Aa // Business Process Management: 22nd Int. Conf., BPM 2024, Krakow, Poland: Proc. – Cham: Springer, Lecture Notes in Computer Science, 2024 – p. 273-290.
3. Zhang Y. Integrating Computer Vision Techniques with Finite Element Phase Field Damage Analysis / Y. Zhang, J. Niiranen // Computers & Structures, 2025.
4. Mikisch S. Visual Analytics Meets Process Mining: Challenges and Opportunities / S. Mikisch, C. Di Ciccio, P. Soffer, B. Weber // IEEE Computer Graphics and Applications, 2024 – p. 132-141.
5. Kratsch W. Shedding Light on Blind Spots: Developing a Reference Architecture to Leverage Video Data for Process Mining / W. Kratsch, F. Koenig, M. Roeglinger //arXiv preprint, 2020.

**МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ НАНОЧАСТИЦ  
БИНАРНОГО СПЛАВА Ag-Cu<sup>1</sup>**

С.Л. Гафнер<sup>1</sup>, А.А. Череповская, Ю.Я. Гафнер, И.С. Бекешева, И.С.

Замулин

Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова,

<sup>1</sup>*sgafner@rambler.ru*

## **1. Введение**

Люминесцентные наночастицы (НЧ) Au, Ag, Cu, Pt и их сплавы могут использоваться в качестве потенциальных сенсорных устройств [1]. Медь является самым экономически выгодным материалом, однако её использование ограничено низким усилением сигнала, связанным с быстрым окислением наночастиц. Известно, что образование оксидов CuO или Cu<sub>2</sub>O ухудшает оптические характеристики материала [2]. Одним из возможных путей решения данной проблемы может стать формирование биметаллических наноструктур, которые будут обладать большей химической устойчивостью за счет присутствия атомов других веществ на поверхности наночастицы Cu.

Наносплав Ag-Cu является сейчас одной из широко изучаемых бинарных систем. Помимо сенсорных приложений экспериментально было показано, что наночастицы Ag-Cu являются лучшими катализаторами реакций восстановления кислорода [3], чем соответствующие чистые наночастицы, также Ag-Cu НЧ находят применение в качестве легкоплавких припоев [4], плазмонных частиц и т.д.

Анализ различного строения бинарных наночастиц и определение структур с минимально возможным значением потенциальной энергии, как наиболее устойчивых, показали [5], что в Ag-Cu НЧ с большим содержанием атомов Ag предпочтительным вариантом является ядро-оболочечная структура со смещенным центром. В этом образце ядро Cu асимметрично размещается в

---

<sup>1</sup>Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-12-20003, <https://rscf.ru/project/23-12-20003/> при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия

наночастице, покрытой с одной стороны очень тонким слоем Ag, что часто называется морфологией квази-Януса. То есть данные компьютерного моделирования предсказывают для Ag-Cu НЧ ядро-оболочечную морфологию с медным ядром как наиболее стабильную при различных целевых составах.

Кроме того, исследователи отмечают наличие метастабильного состояния наночастиц бинарного сплава Ag-Cu [6,7], отличающимся совершенно иным внутренним строением по отношению к оптимизированным структурам с минимальным значением энергии. Характерной особенностью такого состояния является его достаточная термическая устойчивость, в результате которой метастабильные Ag-Cu НЧ могли наблюдаться длительное время в широком интервале температур.

Понимание и контроль условий метастабильности в наноразмерных системах имеет решающее значение для разработки технологических применений таких материалов. Фактически, наночастицы очень часто производятся в сильно неравновесных условиях, что особенно характерно для физических методик синтеза. Это приводит к образованию кинетически захваченных метастабильных структур в качестве конечного результата процесса синтеза [8].

Тем не менее, можно предположить, что с течением времени метастабильные структуры будут развиваться в направлении термодинамического равновесия, и поэтому их свойства, в том числе и структурные, могут измениться. Поэтому определение технологических условий получения метастабильных конфигураций наночастиц и нахождения границ их устойчивости имеет большое практическое значение, но экспериментальные исследования данной проблематики практически отсутствуют. Исходя из этого, целью данной работы стало исследование методами компьютерного моделирования процессов формирования внутреннего строения наночастиц сплава Ag-Cu при их кристаллизации из расплава в зависимости от целевого химического состава, размера и интенсивности отвода термической энергии, а

также определение термической устойчивости полученного внешнего и внутреннего строения Ag-Cu НЧ.

## **2. Компьютерная модель**

На наш взгляд наиболее адекватной методикой исследования процессов кристаллизации и последующего термического отжига может стать молекулярно-динамический (МД) подход, в основе которого лежит расчет классических траекторий движения объекта в фазовом пространстве координат и импульсов его атомов. Этот метод позволяет достаточно точно определить структурные и термодинамические свойства НЧ, а также проследить динамику атомов наночастиц при изменении различных внешних факторов, таких как температура, давление и т.д.

В представленной работе силы межатомного взаимодействия вычислялись с использованием потенциала сильной связи TB-SMA на основе параметров, рассчитанных в [9]. Для моделирования термического воздействия на Ag-Cu наночастицы методом молекулярной динамики была использована компьютерная программа MDNTP, разработанная Dr. Ralf Meyer, University Duisburg Germany.

Температура определялась посредством средней кинетической энергии атомов, которая рассчитывалась на основе скоростного алгоритма Верле с шагом по времени  $h = 1$  фс. При помощи визуализаторов OVITO и xmakemol находился реальный внешний вид и структура изучаемых наночастиц.

## **3. Анализ полученных результатов**

На первом этапе моделирования для оценки получаемого при кристаллизации строения были выбраны бинарные наночастицы Ag-Cu диаметром  $2.0 \geq D \geq 8.0$  nm с процентным содержанием атомов меди в них в пределах 10-50%. При компьютерном моделировании мы воспроизводили методику вакуумно-термического синтеза наночастиц [2, 10], поэтому первичные НЧ были в расплавленном (аморфном) состоянии с наличием максимально возможной сферической формы. Затем эти первичные НЧ подвергались процедуре охлаждения к комнатной температуре ( $T = 300$  K) с разным темпом

отвода термической энергии, соответствующим времени охлаждения  $\tau = 0.5$ ; 1.5 и 2.5 ns. Проведенный анализ полученных результатов показал, что независимо от процентного содержания атомов меди (10-50%) в бинарных наночастицах Ag-Cu и их размера ( $2.0 \geq D \geq 8.0$  nm) при двух наибольших скоростях охлаждения ( $\tau = 0.5$  и 1.5 ns) в подавляющем большинстве случаев фиксировались НЧ с разупорядоченным строением.

Если рассматривать более детально модельные НЧ на конечной стадии кристаллизации, то все же можно заметить тенденцию к разделению химических элементов (сегрегации) на ядро и оболочку. Однако характерной особенностью именно данного бинарного сплава являлась незавершенность такого процесса. Действительно, атомы Ag выдавливались из центра Ag-Cu НЧ, преимущественно к ее поверхности, но явного медного ядра в Ag-Cu НЧ все же не наблюдалось.

Если рассматривать данные, полученные нами при уменьшении скорости отвода тепловой энергии (время охлаждения  $\tau = 2.5$  ns), то здесь был обнаружен ряд интересных особенностей, но только для сплава, содержащего 10% меди. При остальных целевых составах, с более высоким процентным содержанием атомов меди ( $\geq 20\%$ ), внешний и внутренний вид Ag-Cu НЧ, был полностью аналогичен случаям более высокой скорости кристаллизации. Отметим, что именно низкие уровни легирования могут привести к резкой реструктуризации металлических наночастиц [11]. Так для ансамбля  $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$  НЧ диаметром  $D = 2.0$  nm около 30% наночастиц обладали икосаэдрической структурой (рис.1). Остальные НЧ ( $\approx 70\%$ ) по-прежнему были найдены с аморфным строением.

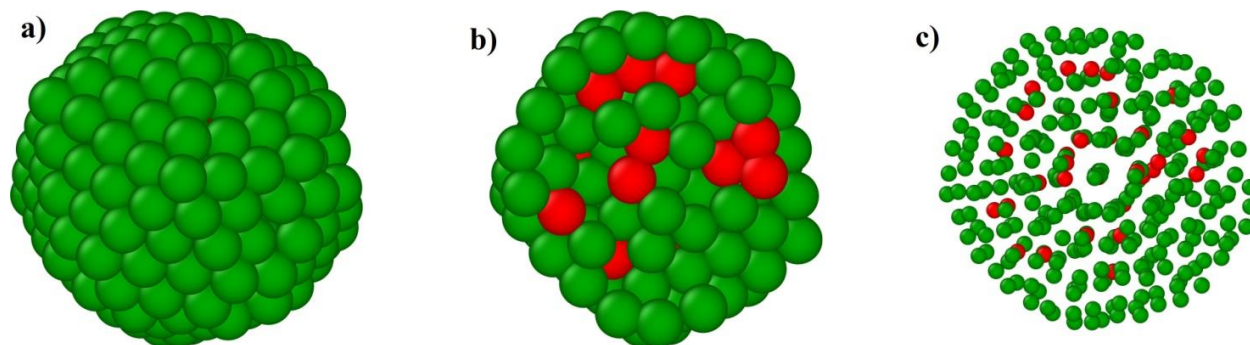


Рис. 1. Наночастица сплава  $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$  диаметром  $D = 2.0$  nm, полученная при охлаждении из расплава к комнатной температуре за время  $\tau = 2.5$  ns. Строение

икосаэдрическое. Зеленым цветом показаны атомы серебра, красным – атомы меди. а) общий вид НЧ; б) наночастица в разрезе; в) атомы НЧ показаны в плоской проекции и с уменьшенным размером.

С увеличением диаметра НЧ до 4.0 nm произошло значительное уменьшение наночастиц, обладающих аморфной структурой ( $\approx 40\%$ ). Из НЧ, имевших выраженное кристаллическое строение, примерно 30% было с пятичастичной симметрией (Ih, Dh), оставшиеся – обладали ГЦК строением. При  $D = 6.0$  nm Ag-Cu НЧ в аморфном состоянии найдено не было. В последнем изученном ансамбле бинарных наночастиц Ag-Cu диаметром  $D = 8.0$  nm все НЧ на конечной стадии моделирования ( $T = 300$  K) обладали в преимущественной мере ГЦК строением с наличием достаточно больших аморфных областей. Отметим, что и здесь выраженное медное ядро обнаружено не было. Возможные причины такого структурного поведения бинарных наночастиц Ag-Cu были подробно рассмотрены нами на основе эвтектического подхода в работе [12].

На втором этапе компьютерного моделирования была произведена оценка устойчивости фиксируемых нами метастабильных состояний. Для этого все полученные при кристаллизации Ag-Cu НЧ были подвержены процедуре термического отжига при температуре  $T = 600$  K в течении нескольких ns с целью фиксации возможного изменения внутреннего или внешнего строения. Рассмотрение полученных результатов начнем с НЧ наименьшего диаметра ( $D = 2.0$  nm) и минимального уровня легирования медью ( $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$ ).

При таких начальных условиях компьютерного эксперимента было найдено, что структура первоначально аморфных НЧ изменилась на достаточно правильное икосаэдрическое расположение атомов (рис. 2 а), но также без формирования медного ядра. НЧ  $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$ , имевшие до отжига икосаэдрическое построение атомов (рис. 1), после прохождения этой процедуры сохраняли эту структурную модификацию без каких либо существенных изменений. Однако при увеличении процентного содержания атомов меди в бинарной наночастице ( $\geq 20\%$ ), никаких структурных переходов зафиксировано уже не было. То есть в таких наночастицах первоначальное аморфное строение даже при условии

достаточно сильного нагрева в течение нескольких наносекунд осталось стабильным. Распределение атомов меди при целевом составе  $\text{Ag}_{80}\text{Cu}_{20}$  также наблюдалось в пределах фактически всей НЧ, но уже для случаев  $\text{Ag}_{70}\text{Cu}_{30}$  и  $\text{Ag}_{60}\text{Cu}_{40}$  атомы меди начинали группироваться в центральной части бинарной наночастицы.

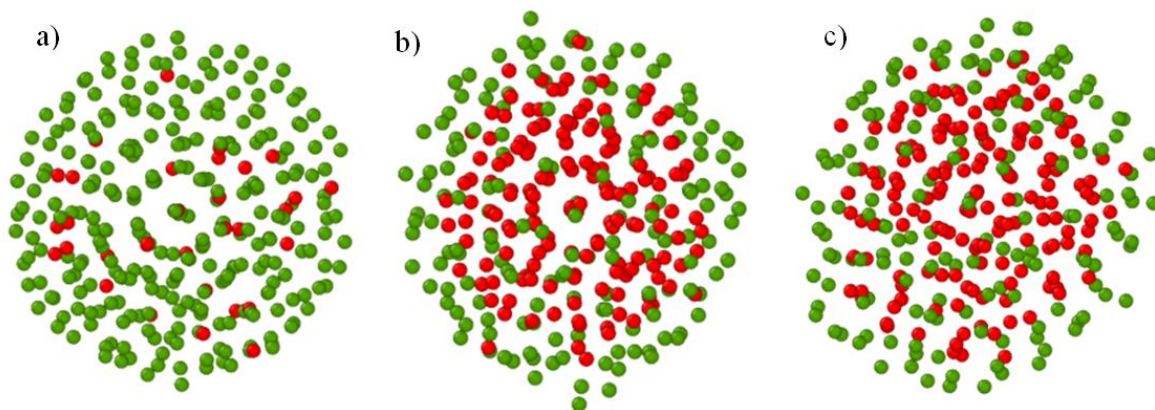


Рис. 2. а) Наночастица сплава  $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$  диаметром  $D = 2.0 \text{ nm}$  с начальным аморфным строением после отжига при  $T = 600 \text{ K}$ . Конечное строение икосаэдрическое. б) Наночастица сплава  $\text{Ag}_{50}\text{Cu}_{50}$  диаметром  $D = 2.0 \text{ nm}$  с зародышем кристаллического строения после отжига при  $T = 600 \text{ K}$ . в) Наночастица сплава  $\text{Ag}_{50}\text{Cu}_{50}$  диаметром  $D = 2.0 \text{ nm}$  с начальным аморфным строением после отжига при  $T = 600 \text{ K}$ . Конечное строение икосаэдрическое дефектное. Зеленым цветом показаны атомы серебра, красным – атомы меди.

Интересным исключением из найденной тенденции стал целевой состав  $\text{Ag}_{50}\text{Cu}_{50}$ . Часть НЧ с аморфным начальным строением так в нем и осталась, несмотря на длительное термическое воздействие. Для другой части, если первичная НЧ после завершения процесса кристаллизации обладала хоть каким то зародышем кристаллической фазы, то наблюдался более уверенный переход к икосаэдрическому строению (рис. 2 б), чем для НЧ с полностью аморфной структурой (рис. 2 в).

Рассмотрим НЧ большего диаметра  $D = 4.0 \text{ nm}$ . Рост размера Ag-Cu НЧ ожидаемо привел к некоторым изменениям в их термоиндуцированном поведении. Так наночастицы с целевыми составами  $\text{Ag}_{50}\text{Cu}_{50}$ ,  $\text{Ag}_{60}\text{Cu}_{40}$ ,  $\text{Ag}_{70}\text{Cu}_{30}$ ,  $\text{Ag}_{80}\text{Cu}_{20}$  даже в условиях длительного нагрева до достаточно высоких

температур ( $T = 600 \text{ K}$ ,  $t = 4 \text{ ns}$ ) сохранили первоначальное аморфное строение без наличия даже какого то подобия медного ядра. И только минимальный уровень легирования ( $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$ ) позволил провести в НЧ некоторые изменения ее внутреннего строения (рис. 3).

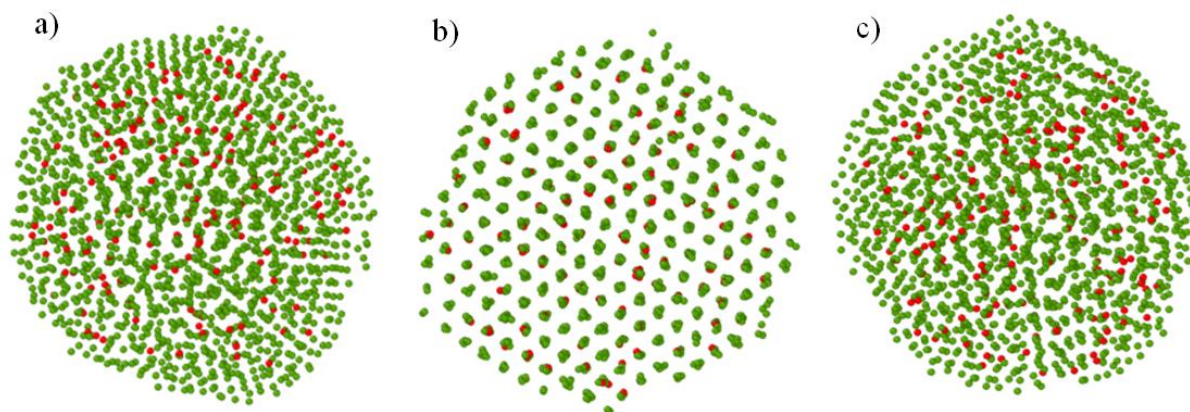


Рис. 3. Наночастица сплава  $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$  диаметром  $D = 4.0 \text{ nm}$  после отжига при  $T = 600 \text{ K}$  в течении  $t = 4 \text{ ns}$ : а) первоначальным Ih строением; б) начальным ГЦК строением; в) начальным аморфным строением. Зеленым цветом показаны атомы серебра, красным – атомы меди.

При этом если после завершения процесса кристаллизации из расплава наночастицы все же обладали какой либо кристаллической модификацией внутреннего строения (Ih или ГЦК), то она оказывалась термически устойчивой и уже не изменялась (рис. 3а и 3б). Если же начальная структура была аморфной, то наблюдался уже отмеченный ранее переход к достаточно правильному икосаэдрическому построению атомов (рис. 3в). Во всех модельных случаях ядро-оболочечное строение бинарных наночастиц Ag-Cu зафиксировано не было.

Далее рассмотрим кластеры большего размера  $D = 6.0 \text{ nm}$ . Для анализа был выбран целевой состав с 10% содержанием Cu, как обладающий наиболее интересными свойствами с точки зрения возможного атомного упорядочения. Как было показано нами на первом этапе моделирования, после завершения процесса кристаллизации (время охлаждения  $\tau = 2.5 \text{ ns}$ ) у всех НЧ отсутствовало аморфное строение, явно облегчающее возможные дальнейшие структурные переходы. Однако необходимо отметить не идеальность сформированного

строения бинарных наночастиц. Так для ГЦК структур наблюдались вкрапления аморфной фазы, остальные НЧ имели дефектную икосаэдрическую морфологию.

Проанализируем полученные результаты МД моделирования. Весь ансамбль НЧ также был отожжен при  $T = 600$  К, но уже в течении большего времени  $t = 6$  ns. В ходе проведенного анализа данных был сделан вывод о том, что если после завершения процесса кристаллизации НЧ обладала дефектным икосаэдрическим строением, отжиг не привел к изменению порядка расположения атомов в направлении ГЦК фазы, характерной для объемных образцов [2]. Икосаэдрическая политипная модификация сохранялась, и даже иногда наблюдалось улучшение первично дефектного икосаэдра.

Однако, если перед процессом отжига начальное строение НЧ было ГЦК с наличием фрагментов разупорядочения, то возможных сценариев термически обусловленной эволюции внутреннего строения было уже несколько. Так в ряде случаев наблюдался переход от дефектной ГЦК фазы к икосаэдрической, причем иногда даже достаточно хорошего качества. Такой переход происходил примерно в половине таких модельных случаев. Остальные НЧ после прохождения процедуры отжига примерно в равной пропорции формировали либо ГЦК строение, либо декаэдрическое. Все это еще раз доказывает близость энергетических состояний для данных структурных модификаций в случае бинарных наночастиц Ag-Cu с малым уровнем легирования, в нашем случае это  $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$ . Образование ядро-оболочечного вида Ag-Cu НЧ по-прежнему зафиксировано не было.

Аналогичные результаты были получены и при моделировании термического отжига при  $T = 600$  К  $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$  НЧ диаметром  $D = 8.0$  nm ( $N = 15995$  атомов). Однако с увеличением размера НЧ в ходе отжига наблюдался явный дрейф конечного строения  $\text{Ag}_{90}\text{Cu}_{10}$  НЧ в сторону преимущественно декаэдрической модификации, являющейся промежуточной между Ih и ГЦК. Данный факт доказывает, что размер  $D = 8.0$  nm является пределом фиксации икосаэдрического строения в Ag-Cu НЧ как в случае начального аморфного

строения, так и в случае строения с дефектным пятичастичным построением атомов.

#### 4. Заключение

Таким образом, проведенное компьютерное моделирование процесса кристаллизации наночастиц Ag-Cu с использованием нескольких скоростей отвода тепла, позволяет сделать следующие выводы. Реальная внутренняя структура таких НЧ, синтезированных физическими методами (например, создание SERS подложек [2, 10] или производство из высокотемпературной газовой среды [13]), существенно отличается от структур, соответствующих условиям термодинамического равновесия.

Помимо этого, в ходе проведенного далее термического отжига было найдено, что при малых уровнях легирования медью в Ag-Cu НЧ все же возможно образование пятичастичной симметрии и были зафиксированы условия возникновения данного эффекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferrando R. Quantum effects on the structure of pure and binary metallic nanoclusters / R. Ferrando, A. Fortunelli, and G. Rossi // *Physical Review B*. – 2005. – № 72. Art. no. 085449. – 9 pp.
2. Dubkov S.V. SERS in red spectrum region through array of Ag–Cu composite nanoparticles formed by vacuum-thermal evaporation / S.V. Dubkov, A.I. Savitskiy, A. Yu Trifonov et.al // *Optical Materials: X*. – 2020. – V. 7. – Art. no. 100055. – 9 pp.
3. Shin K. Structural stability of AgCu bimetallic nanoparticles and their application as a catalyst: a DFT study / K. Shin, D.H. Kim, S.C. Yeo, H.M. Lee // *Catalysis Today*. – 2012. – № 185. – P. 94–98.
4. Kim S.J. Fabrication of conductive interconnects by Ag migration in Cu–Ag core-shell nanoparticles / S.J. Kim, E.A. Stach, C.A. Handwerker // *Applied Physics Letters*. – 2010. – № 96. Art. no. 144101. – 3 pp.
5. Bochicchio D. Structures and segregation patterns of Ag-Cu and Ag-Ni nanoalloys adsorbed on MgO(001) / D. Bochicchio, R. Ferrando, E. Panizon, G. Rossi

// Journal of Physics: Condensed Matter. – 2016. – V. 28. – № 5. – Art. no. 064005. – 13 pp.

6. Nelli D. Two-Steps Versus One-Step Solidification Pathways of Binary Metallic Nanodroplets / D. Nelli, El Yakout El Koraychy, M. Cerbelaud et. al. // ACS Nano. – 2023. – V. 17. – P. 587-596.

7. Rapetti D. Optimizing the Shape and Chemical Ordering of Nanoalloys with Specialized Walkers / D. Rapetti, C. Roncaglia, R. Ferrando // Advanced Theory and Simulations. – 2023. – V. 6. – Art. no. 2300268. – 13 pp.

8. Nelli D. Core-shell vs. multi-shell formation in nanoalloy evolution from disordered configurations / D. Nelli, R. Ferrando // Nanoscale. – 2019. – V. 11. – P. 13040-13050.

9. Rapallo A. Global optimization of bimetallic cluster structures. I. Size-mismatched Ag-Cu, Ag-Ni, and Au-Cu systems / A. Rapallo, G. Rossi, R. Ferrando et al. // The Journal of Chemical Physics. – 2005. – V. 122.– I. 19. – P. 194308-1-194308-13.

10. Gromov D.G. Optimization of nanostructures based on Au, Ag, Au-Ag nanoparticles formed by thermal evaporation in vacuum for SERS applications / D.G. Gromov, S.V. Dubkov, A.I. Savitskiy, et. al. // Applied Surface Science. – 2019. – V. 489. – P. 701-707.

11. Panizon E. Tuning the structure of nanoparticles by small concentrations of impurities / E. Panizon, D. Bochicchio, G. Rossi, R. Ferrando // Chemistry of Materials. – 2014. – № 26. – P. 3354–3356.

12. Ryzhkova D. A. Use of Eutectic Effects in the Possible Creation of Phase-Change Memory Cells Based on Ag-Cu Nanoclusters / D. A. Ryzhkova, S. L. Gafner, Yu. Ya. Gafner // Physics of Metals and Metallography. – 2023. – V. 124. – P. 1041-1048.

13. Gafner Yu. Ya. The role of gold atom concentration in the processes of formation of Cu-Au nanoparticles from the gas phase / Yu. Ya. Gafner, S. L. Gafner, D. A. Ryzhkova, A. V. Nomoev // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2021. – V. 12. – P. 72-81.

## **АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНОСТИ И ЭВОЛЮЦИИ МОДЕЛИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

М.Г. Доррер<sup>1</sup>, М.А. Масюк<sup>2</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Россия, Красноярск, <sup>1</sup>*mdorrer@mail.ru*, <sup>2</sup>*masuk-max@yandex.ru*

Широкое распространение и развитие корпоративных информационных систем как класса программного обеспечения привело к унификации некоторых форматов данных, таких как журнал событий – Event Log. Независимо от производителя информационной системы, как правило, события в рамках реализации бизнес-процессов «логируются» в стандартном виде и содержат одинаковые атрибуты: Case ID – номер экземпляра процесса, Activity – событие или действие, Timestamp – дата и время, User – пользователь и т.д. Наличие данных подобного рода позволяет исследовать бизнес-процессы компании на основе объективных данных используя инструменты Process Mining. Данный подход является актуальным и получил широкое распространение во всем мире, поскольку повышение эффективности бизнес-процессов представляет как практический интерес для субъектов экономики, так и научный интерес для исследователей в области BI-анализа [1, 2].

В 2022 году авторами была выполнена работа [3, 4] по исследованию и оптимизации бизнес-процессов образовательной организации с использованием библиотеки PM4Py (разработана институтом прикладных информационных технологий Фраунгофера, FIT) [5]. На основе журнала событий, состоящего из примерно 10 тысяч строк, были построены карта, дерево и модель основного процесса, а также разработан программный инструмент для менеджмента, позволяющий обнаруживать потенциально проблемные ситуации на основе данных о поведении клиентов. Инструмент предназначался для решения таких задач как анализ посещаемости занятий и пропусков по различным причинам,

оценка влияния фактора смены преподавателя на эффективность обучения, использование площадей и временных ресурсов в филиалах компании. В результате проделанной работы организация-заказчик получила информацию о нескольких десятках «аномальных» образовательных траекторий, анализ которых способствовал выявлению имеющихся системных проблем и повышению ключевых показателей эффективности. Инструмент PM4Py продемонстрировал достоинства, заключающиеся в высокой скорости работы алгоритмов, простоте использования и отсутствии лицензионных ограничений.

Следующим этапом стало исследование стационарности и эволюции бизнес-процессов в данной образовательной организации за последующий трехлетний период (2023-2025 г.г.) с использованием методов Process Mining и методологии цифровых двойников. Основные этапы исследования, результаты, а также описание используемого инструментария, которые могут быть полезны специалистам данной области, представлены ниже.

В результате анализа журналов событий за последующий период (26 тысяч записей) были разработаны цифровые двойники бизнес-процессов для оценки стабильности, метрик качества и паттернов нежелательных событий. Результаты показывают высокое соответствие процессов (1,000 для всех периодов), но выявляют проблемы с точностью моделей, которая снизилась с 0,325 до 0,236 в объединенной модели. Частота нежелательных событий оставалась стабильной на уровне примерно 4,1%. Данное исследование способствует пониманию эволюции бизнес-процессов в образовательном контексте, подтверждает сложный характер образовательной деятельности и предоставляет методологию для непрерывного мониторинга и улучшения.

Подготовка данных представляла собой стандартную процедуру очистки, фильтрации и преобразования необработанной информации о событиях в стандартный формат XES [6], совместимый с большинством инструментов Process Mining. На этом этапе использовались следующие python-библиотеки: PM4Py, Pandas, Numpy. Результатом данного этапа стали файлы

EventLogPE\_2022.xes и EventLogPE\_2023\_2025.xes содержащие данные о событиях.

Для обнаружения процессов использовался алгоритм Inductive Miner библиотеки PM4Py, который позволяет строить карты процессов непосредственно из журналов событий и преобразовывать их в сети Петри. Данный алгоритм отличается способностью обрабатывать сложные структуры процессов и гарантировать корректность обнаруженных моделей [7]. В качестве резервного варианта, для случаев, когда Inductive Miner испытывал сложности использовался алгоритм Alpha Miner.

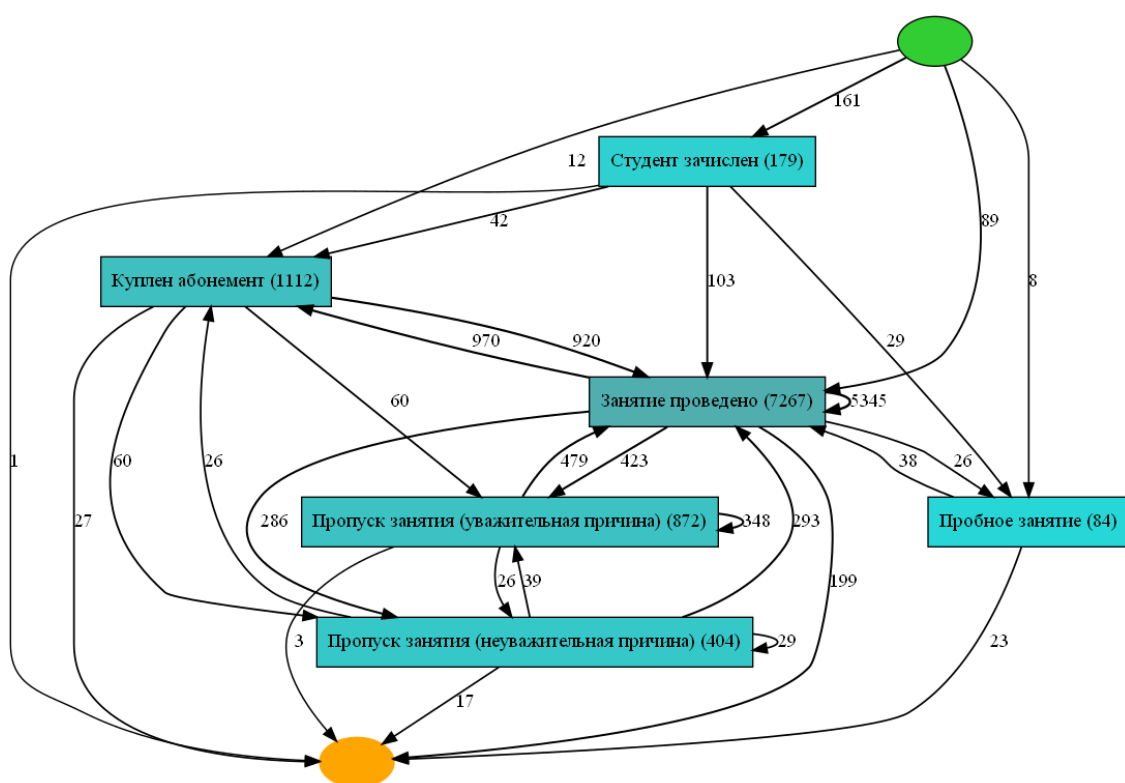


Рис. 1. Карта бизнес-процесса, построенная эвристическим алгоритмом PM4Py

Для каждой обнаруженной процессной модели были вычислены три ключевые метрики качества

1. Fitness – измеряет, насколько хорошо модель объясняет наблюдаемое поведение в журнале событий [8].

2. Precision – оценивает, насколько точно модель описывает наблюдаемое поведение [9].

3. Simplicity – оценивает сложность модели с использованием логарифмической функции элементов модели.

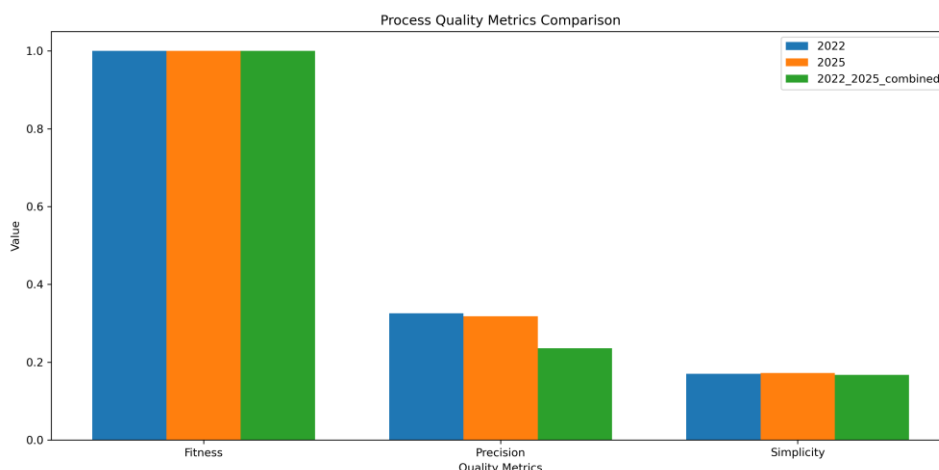


Рис. 2. Сравнение показателей качества процесса.

Цифровой двойник создавался по методологии, предложенной Доррером [10]. В результате были получены виртуальные представления бизнес-процессов, пригодные для анализа и сравнения во временных разрезах. Двойник включал процессные модели, метрики качества и паттерны событий для обеспечения комплексного анализа [11].

Анализ базовых метрик процессов выявил значительный рост активности процессов между 2022 и 2025 годами. Количество событий увеличилось на 70% (с 9 918 до 16 861), а количество кейсов выросло на 8,5% (с 270 до 293). Объединенный лог содержал 26 779 событий по 484 кейсам. Несмотря на этот рост, разнообразие активностей оставалось постоянным – 6 различных активностей в оба периода (Таблица 1).

Таблица 1

Сравнение базовых метрик процессов

| Период | Количество событий | Количество кейсов | Количество активностей |
|--------|--------------------|-------------------|------------------------|
| 2022   | 9 918              | 270               | 6                      |

|              |        |     |   |
|--------------|--------|-----|---|
| 2023-2025    | 16 861 | 293 | 6 |
| Объединенный | 26 779 | 484 | 6 |

При оценке метрик качества все процессные модели продемонстрировали идеальное соответствие (1,000), что указывает на то, что обнаруженные модели полностью объясняют наблюдаемое поведение в журналах событий. Однако метрики точности выявили проблемы со специфичностью моделей, снизившись с 0,325 в 2022 году до 0,318 в 2023-2025 году, при этом объединенная модель показала самую низкую точность (0,236). Метрики простоты оставались относительно стабильными для всех моделей, в диапазоне от 0,168 до 0,172 (Таблица 2).

Таблица 2

Сравнение метрик качества процессов

| Период       | Fitness | Precision | Simplicity |
|--------------|---------|-----------|------------|
| 2022         | 1.000   | 0.325     | 0.170      |
| 2023-2025    | 1.000   | 0.318     | 0.172      |
| Объединенный | 1.000   | 0.236     | 0.168      |

Анализ нежелательных событий – «Пропуск занятий по неуважительной причине» показал устойчивые паттерны за различные периоды времени. Абсолютное количество нежелательных событий увеличилось с 404 в 2022 году до 700 в 2023-2025 году, но частота оставалась стабильной на уровне примерно 4,1% как для отдельных периодов, так и для объединенного набора данных (Таблица 3).

Таблица 3

Анализ нежелательных событий

| Период       | Количество<br>нежелательных событий | Всего<br>событий | Частота |
|--------------|-------------------------------------|------------------|---------|
| 2022         | 404                                 | 9 918            | 0.0407  |
| 2023-2025    | 700                                 | 16 861           | 0.0415  |
| Объединенный | 1 104                               | 26 779           | 0.0412  |

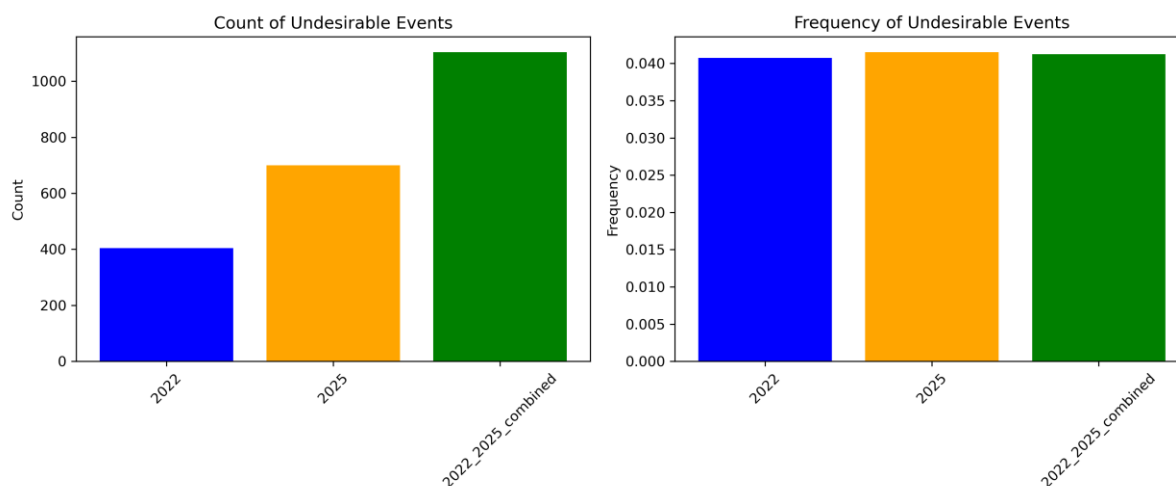


Рис. 3. Количество и частота нежелательных событий

Обнаруженные процессные модели выявили структурное сходство между периодами с незначительными вариациями в вероятностях переходов. На Рисунке 4 показана BPMN-модель для процесса, основанная на данных 2022 года, на Рисунке 5 иллюстрируется процесс 2023-2025 года. Объединенная модель – Рисунок 6 включает поведение из обоих периодов.

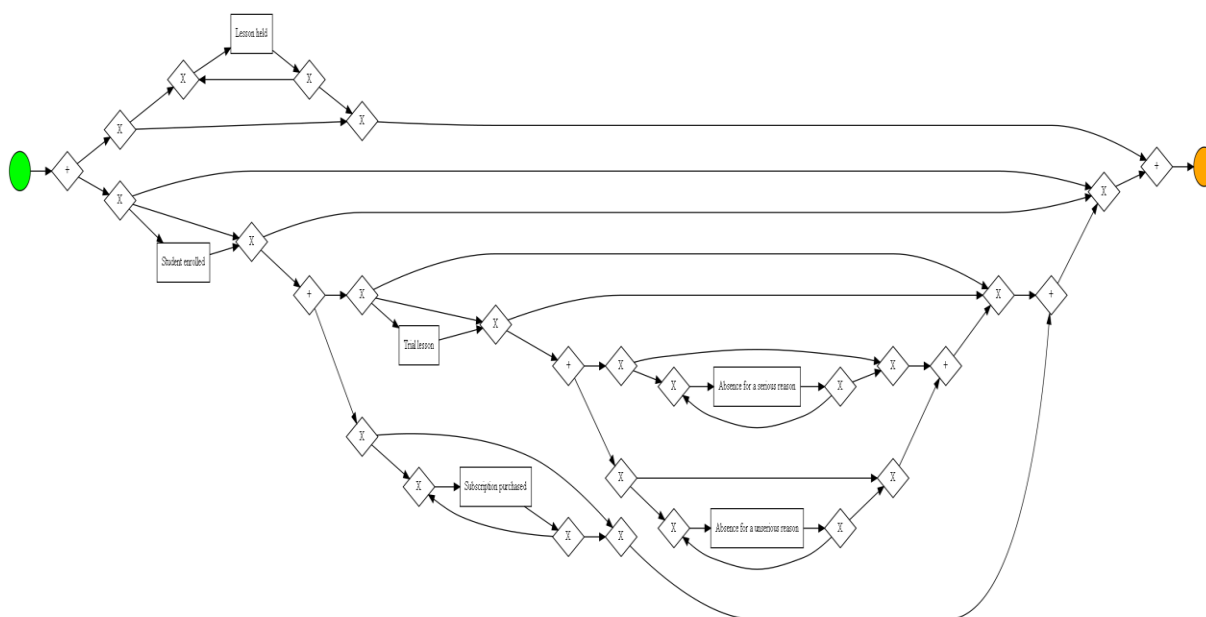


Рис. 4. Сгенерированная PM4Py BPMN-модель процесса обучения слушателей на основе данных 2022 года.

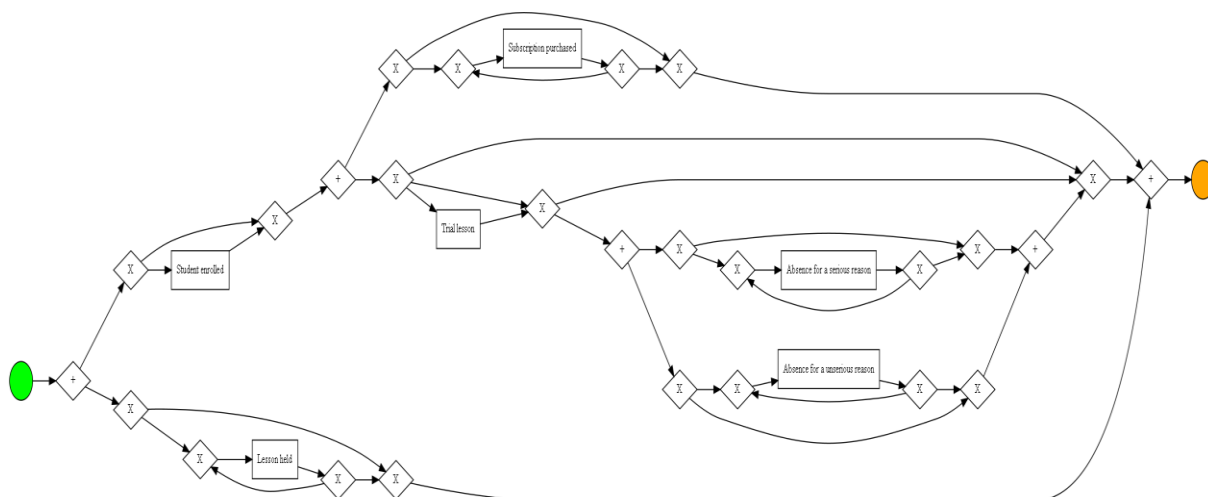


Рис. 5. Сгенерированная PM4Py BPMN-модель процесса обучения слушателей на основе данных 2023-2025 года.

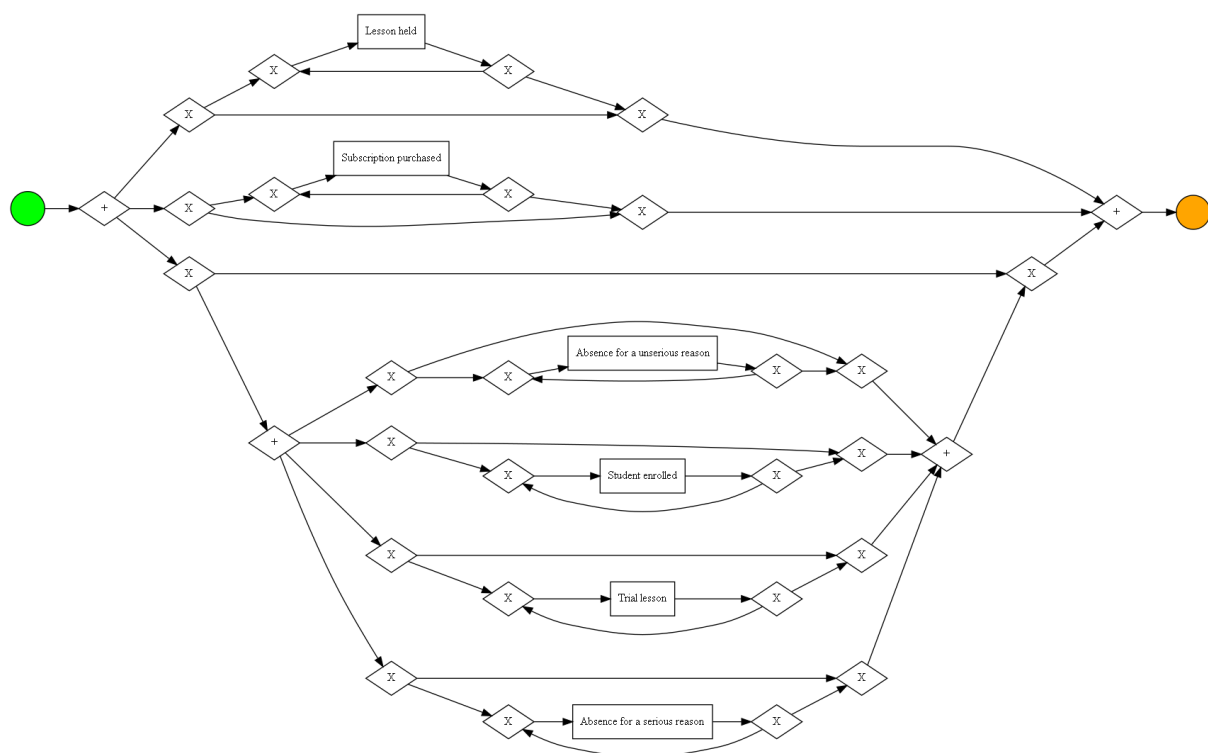


Рис. 6. Обобщенная BPMN-модель на основе данных 2022-2025 года.

По итогам интерпретации результатов были сделаны следующие выводы. Идеальные показатели соответствия восстановленной модели процессу (fitness) для всех моделей указывают на то, что алгоритм Inductive Miner успешно определил базовую структуру процесса. Однако снижающиеся значения метрики precision, показывающей, насколько поведение, разрешаемое моделью, соответствует реальному поведению, наблюдаемому в событийном журнале, позволяют предположить, что хотя модели всесторонне описывают возможные

поведения, они становятся менее точны при охвате нескольких временных периодов. Вероятно, причина заключается в том, что варианты протекания процессов с течением времени усложнились и это привело к более обобщенной модели при объединении временных периодов. Постоянное количество активностей (6 различных активностей) в разные периоды позволяет предположить стабильность процесса на макроуровне, в то время как изменения в метриках precision могут указывать на эволюцию на микроуровне и появление новых траекторий или точек принятия решений.

Проведенное авторами исследование демонстрирует высокую применимость методологий Process Mining и цифрового двойника для лонгитюдного анализа стационарности бизнес-процессов. Результаты продемонстрировали ожидаемую эволюцию процессов, а не их структурное изменение. Основные активности остаются стабильными. Стабильность частоты нежелательных событий на уровне 4,1% позволяет предположить наличие закономерностей в причинах возникновения данных событий в оба периода. Хотя объем процессной активности увеличился, доля несоответствующих активностей оставалась постоянной, что указывает на системные, а не временные факторы, влияющие на эти события. Этот и другие выводы согласуется с теорией организационных процедур [12].

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты позволяют менеджменту компании выявлять и отслеживать с течением времени эволюцию бизнес-процессов, предвидеть их будущие изменения, выявлять причины данных изменений, а также обнаруживать нестабильность в метриках качества. В конечном счете это позволит контролировать эффективность принимаемых мер по оптимизации бизнес-процессов, фокусировать усилия на «проблемных местах».

Использованный инструментарий показал свою высокую эффективность и может быть рекомендован для использования вне зависимости от направления деятельности обследуемых организаций и их масштабов. В качестве следующего этапа авторы планируют применить и апробировать методы прогнозного моделирования и проактивной оптимизации бизнес-процессов на имеющихся данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van der Aalst W. et al. Process Mining Manifesto. 2012. P. 169–194.
2. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H.A. Fundamentals of Business Process Management, Second Edition. Springer. 2018. DOI 10.1007/978-3-662-56509-4.
3. Masyuk M.A., Dorrer M. Using PM4Py for Process Mining in an Educational Organization // Advances in Automation V. RusAutoCon 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1130. Springer, Cham, 2024.
4. Масюк М.А., Доррер М.Г. Разработка инструмента интеллектуального анализа эффективности деятельности образовательной организации на основе PM4Py // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 12. Часть 2. С. 195-204. DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2022\_12\_195.
5. PM4Py – Process Mining for Python: [Электронный ресурс]. URL: <https://processintelligence.solutions/pm4py> (Дата обращения: 28.08.2025).
6. IEEE 1849-2023 XES Standard: [Электронный ресурс]. URL: <https://xes-standard.org> (Дата обращения: 28.08.2025).
7. Van der Aalst W. M. P. Process Mining: Data Science in Action. Springer, Berlin, 2016.
8. Thomas Chatain, Mathilde Boltenhagen, Josep Carmona. Anti-Alignments – Measuring The Precision of Process Models and Event Logs. Information Systems, 2021.
9. Munoz-Gama J., Carmona J. A Fresh Look at Precision in Process Conformance // LNCS, 6336, 2010. P. 211-226.
10. Dorrer M.G. The digital twin of the business process model // Journal of Physics: Conference Series, 1679(3), 2020. 032096.
11. Masaev S.N. et al. Digital twin in advanced training of engineering specialists // Journal of Physics: Conference Series, 1889(2), 2021. 022045.
12. Попов Е. В. Эволюционная теория: «рутинный» подход к анализу стабильного и изменчивого в функционировании предприятия / Е. В. Попов, Н. В. Хмелькова // Вестник УГТУ–УПИ. Серия экономика и управление. – 2004. – № 4. – С. 5-12.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА МОБИЛЬНОГО РОБОТА КАК НАБОРА ИНФОРМАЦИОННО- ДВИГАТЕЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ<sup>2</sup>

В.В.Иванова<sup>1,2</sup>, А.М.Корсаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.

Ульянова (Ленина), *[overtpace@gmail.com](mailto:overtpace@gmail.com)*

<sup>2</sup>ГНЦ РФ НИИ РТК, *[anton\\_korsakov@gmail.ru](mailto:anton_korsakov@gmail.ru)*

## Введение

Для осуществления своих функциональных возможностей мобильные роботы перемещаются в окружающей среде, при этом взаимодействуя с ней: обходят препятствия, двигают объекты, считывают различные данные из внешнего мира. Автономность мобильного робота повышает его производительность, так как обладая этим свойством, робот может самостоятельно добираться до заданного места [1], чтобы выполнить поставленную цель. Для успешной навигации робот должен не только определять ориентиры, но и уметь их обходить, а также выбирать маршрут следования при доступности нескольких вариантов [2]. Обеспечение навигации автономного мобильного робота в условиях, когда изменения окружающей среды непредсказуемы, а связь с оператором может быть прервана в любой момент, является актуальной задачей в сфере наземной робототехники [3].

При навигации в городе из-за большого количества движущихся людей робот помимо выполнения своей основной задачи должен обеспечивать безопасность тех, кто находится поблизости от него [4]. Для этого траектория движения может быть запланирована на основе реакции (смена направления при появлении человека на пути следования) или на основе составления прогноза (рассчитывается траектория движения человека, в соответствие с которой происходит изменение маршрута робота).

---

<sup>2</sup> Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00553-25-00 от 25.12.2024 «Исследование методов организации навигации роботов в сложных недетерминированных средах на базе теории когнитивного представления пространства» (FNRG-2025-0007 1024050200005-9-1.2.1;2.2.2)

Также навигация робота может осуществляться в среде, которая является средой повышенной опасности, например, открытый космос, недра земли, эпицентр природной катастрофы или радиоактивная зона. Например, в [5] описана автономная навигация воздушных роботов в подземных шахтах, где не работал GPS, а окружающая среда содержала полностью затемненные участки, лишенные текстур. В этом случае исследовалась совокупность данных с визуальных и тепловых камер, лидаров и сигналов инерциально-измерительного блока, а планирование пути происходило с использованием алгоритма выборки на основе удаляющегося горизонта.

В [6] был предложен метод автономной навигации роботов для ядерной аварийной службы. В результате анализа многослойной карты, которая включала в себя карту радиационной активности и карту затрат на прохождение препятствий, глобальный планировщик формирует траекторию пути, а на его основе локальный планировщик в сочетании с моделью кинематики робота осуществляет управление до момента достижения цели.

В [7] приведен сценарий поведения автономных роботов, которые применяются при исследовании изменений окружающей среды вследствие природной катастрофы. Для осуществления навигации использовались два дерева поведения (моделирование поведения через иерархию узлов), работающих параллельно. Дерево приложения содержало логическую структуру глобальной задачи, а дерево навигации обрабатывало все необходимые задачи по перемещению робота между двумя точками.

В [8] был описан метод поиска источников радиации с помощью воздушных роботов в условиях отсутствия GPS. Для оценки уровня радиации использовался сцинтиллятор на основе йодида цезия. После обработки полученных с его помощью данных и определения областей с уровнем повышенной радиации точное местоположение источников определялось с помощью визуально-инерциальной локализации.

Отсутствие компаса и GPS значительно усложняют задачу навигации, но для мобильного робота описать область нахождения можно не только с

помощью ее представления в декартовой системе координат (ДСК). Так, в интерпретирующей навигации текущее местоположение робота определяется с помощью описания изменений окружающего пространства.

Например, в [9] аналогом ДСК выступал граф информационной эквивалентности, где узлам графа соответствовали области с разным описанием (районы информационной эквивалентности или РЭИ), а ребрам – изменение описаний при переходе из одной области в другую, а в [10] в качестве ориентиров использовались двумерные штрих-коды, относительно видимости которых оценивалась поза гуманоидного робота.

Несмотря на большое количество вариантов обеспечения навигации автономного мобильного робота в стохастической среде без использования навигаторов, каждое решение ограничено в применимости, поэтому задача построения маршрута автономного мобильного робота в условиях неопределенной среды остается актуальной.

### **Постановка задачи и методы решения**

Цель работы состояла в том, чтобы исследовать возможность построения маршрута мобильного робота по набору интерпретируемых команд.

Задачи, которые требовалось решить для достижения цели, сводились к построению карты местности с некоторым набором ориентиров, расположенных на ней, и проверке возможности достижения всех ориентиров из любой точки карты с последующим возвращением в начальную область.

Также ставилась задача определить, что являлось ориентиром на карте: РЭИ или непосредственно распознаваемые на карте объекты.

Разрабатываемый метод основан на динамическом построении и корректировке когнитивной карты путем интерпретации информационно-двигательных действий (ИДД). Последовательный вызов ИДД являлся основой для инструкции управления движением автономного мобильного робота.

В данной работе не приводится обеспечение локальной навигации (построение маршрута в режиме реального времени), рассматривается только глобальная навигация (построение маршрута по имеющейся карте).

### **Описание робота**

Физические свойства робота и окружающей среды в используемом симуляторе не учитывались, поэтому автономный мобильный робот был представлен в виде материальной точки, из которой выходили лучи, обозначающие расположение дальномеров и сегментов камеры и их зону действия.

Число дальномеров было равно трем (фронтальный дальномер и два боковых), а число сегментов камеры составило 45 (по 9 градусов на сегмент). Эти параметры, а также радиус действия дальномеров и камеры настраивались в соответствии с угловой и линейной скоростями (при слишком большой скорости и малой дальности дальномеров не все ориентиры были идентифицированы).

Список действий, которые мог совершать робот при выполнении ИДД, включал в себя движение вперед, танковый поворот налево или направо, а также остановку.

Входные данные, получаемые на каждом шаге, были представлены показаниями с дальномеров, а также данными о видимых типах объектов, полученных с 45 секторов 360-градусной камеры. При этом робот не был способен различать между собой объекты одного типа данных и использовать данные о координатах своего местоположения.

### **Описание информационно-двигательных действий**

ИДД назывались базовыми, если их нельзя было разделить на составляющие. К таким ИДД относились команды «повернись», «осмотрись», «поверни», и «едь вдоль».

При выполнении команды «повернись» робот совершал поворот вокруг своей оси до момента, пока в центральный сегмент камеры не попадал объект искомого типа.

Команда «осмотрись» означала для робота совершение поворота вокруг своей оси, пока последовательность данных, которую выдавали сегменты камеры, не совпадали с последовательностью, зафиксированной в начальный момент, или пока не заканчивалось время, заданное на случай вращения робота в пустом пространстве.

Условием выполнения команды «поверни» было обеспечение нахождения робота перед препятствием. При выполнении этой команды робот совершал поворот до тех пор, пока значение, полученное с бокового дальномера, не становилось больше значения, переданного с дальномера на предыдущем шаге. Также команда «поверни» включала в себя корректировку поворота.

Команда «едь вдоль» была связана с движением робота вдоль объекта до тех пор, пока не пройдено первое препятствие, распознанное боковым сегментом камеры.

На основе базовых команд строились более сложные команды: «ищи», «обойди» и «скройся». Например, команда «ищи» состояла из двух этапов. Сначала робот осуществлял команду «повернись», а после ее успешного выполнения робот двигался к найденному ориентиру до тех пор, пока получаемое с переднего дальномера значение не стало меньше порогового.

Условием выполнения команды «обойди» было обеспечение нахождения робота перед двумерным препятствием. Команда «обойди» состояла из последовательного выполнения двух пар команд: «поверни» и «едь вдоль». В результате выполнения команды робот оказывался на противоположной стороне препятствия.

Команда «скройся» строилась на тех же базовых командах, что и «обойди», за исключением последнего шага, где вместо команды «едь вдоль» выполнялось движения вперед до срабатывания таймера. Также команда «скройся» отличалась от команды «обойди» тем, что препятствие, перед которым должен находиться робот для корректного выполнения команды, могло быть как одномерным, так и двумерным. В первом случае робот успешно обходил препятствие, а во втором – скрывался за его углом.

На основе перечисленных выше сложных команд реализовывался сценарий под названием «вернись». Так как во время последовательного выполнения роботом ИДД команды записывались в специальный список, то при появлении команды «вернись» происходило инвертирование списка с некоторыми особенностями, и последовательное выполнение записанных в нем команд. В результате отработки сценария «вернись» робот оказывался в начальной области при условии, что первой командой в неинвертированном списке была команда «ищи».

### Экспериментальная часть

В симуляторе на ряде сцен была успешно проведена проверка на то, способен ли робот из любой начальной точки добраться до заданного ориентира.

Сцена, представленная на рисунке 1, содержала три типа объектов: «дерево» (круг), «забор» (линия) и «здание» (прямоугольник), а робот мог совершать танковый поворот, движение вперед и остановку.

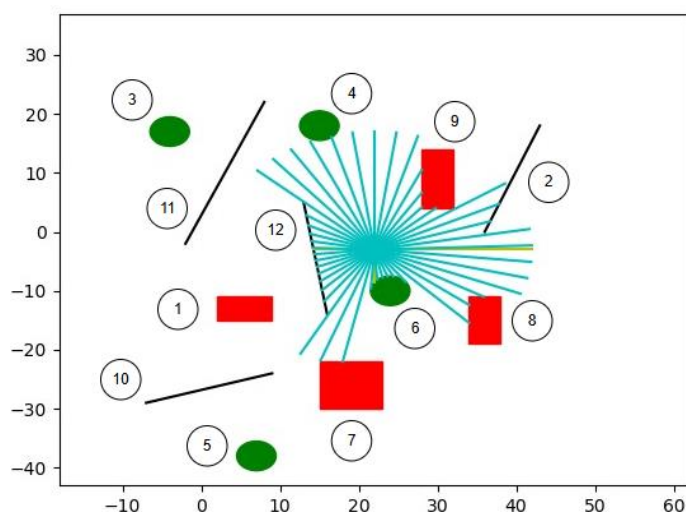


Рис. 1. Представление сцены

Также в симуляторе был проведен эксперимент, в котором с помощью имеющихся команд находящийся в центре карты робот должен был добраться до любого объекта и вернуться обратно.

Для наглядности перехода между ориентирами был построен граф, в узлах которого находились ориентиры, а в качестве ребер – ИДД.

Ограничение расположения ориентиров на карте заключалось в том, что в области действия камеры и дальномеров должен был постоянно находиться хотя бы один ориентир. Кроме того, было ограничение на размещаемые на карте ориентиры. Минимальный размер ориентиров должен был быть таким, чтобы считываться двумя и более сегментами камеры одновременно.

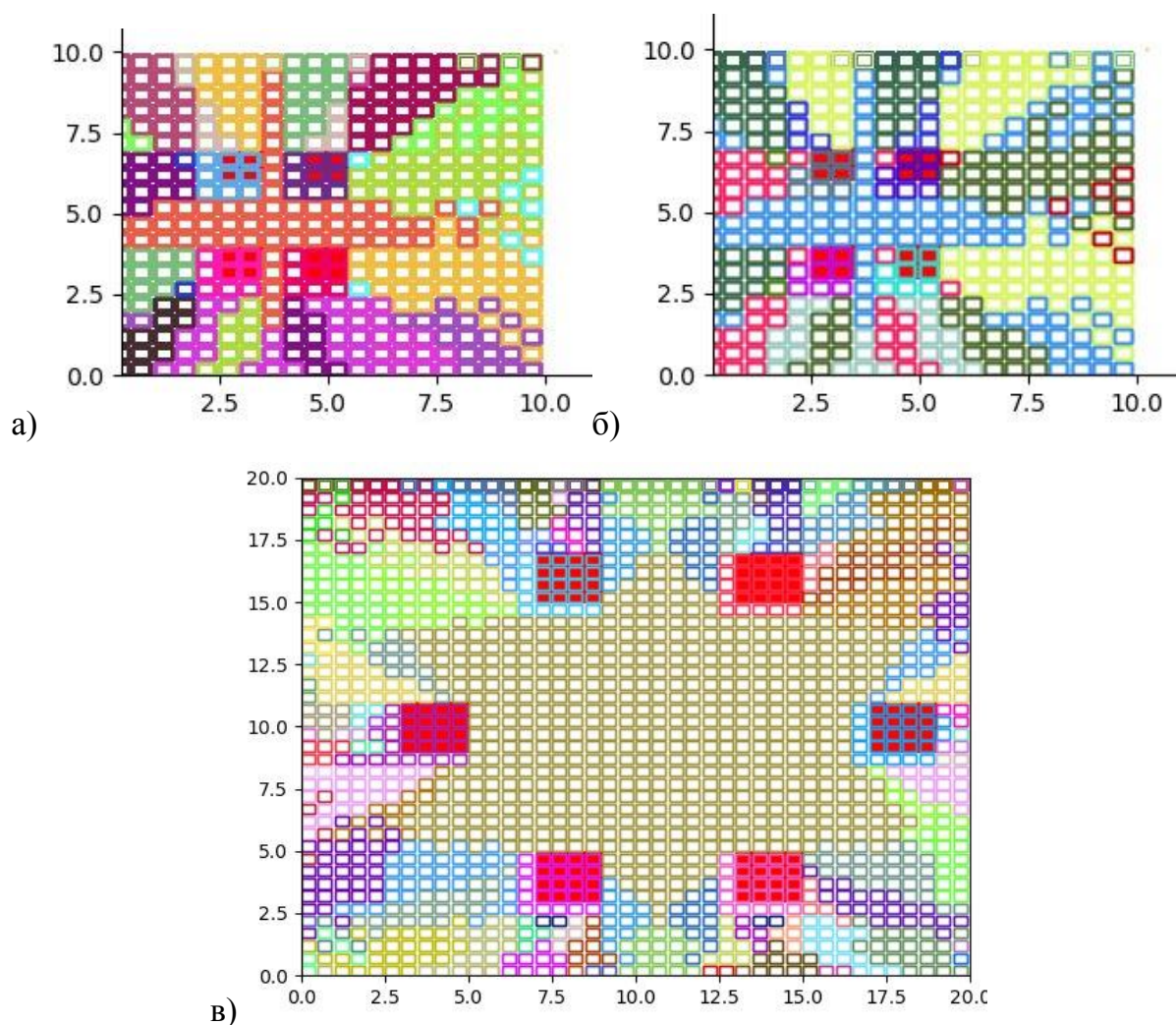


Рис. 2. Представление районов информационной эквивалентности: а) карта с четырьмя ориентирами с учетом порядкового номера, б) карта с четырьмя ориентирами без учета порядкового номера, в) карта с шестью ориентирами.

В ходе проведения эксперимента возникла ситуация, при которой в объектив камеры попадало несколько объектов одного типа и ИДД мог быть истолкован неверно (на представленной сцене искомый ориентир – это здание 1, огороженное заборами 10 и 12). Решение подобной ситуации заключалось в том, что если искомый объект находился между двух объектов одного типа, то для

корректной отработки сценария «вернись» движение осуществлялось сначала от объекта 12 к 10, и только потом к 1.

### **Альтернативный способ представления графа**

Как уже было сказано ранее, в качестве альтернативного способа представления графа рассматривалось использование в качестве узлов графа РЭИ, первые упоминания о которых встречались в работах ученых из института им. Келдыша [9].

Граница между такими РЭИ определялась наличием изменений в списке видимых ориентиров, при этом учитывалось не только наличие ориентира определенного типа, но и его порядковый номер в списке.

Было проведено несколько экспериментов, в ходе которых выяснилось, что в случае, если ориентиры представлены в виде материальных точек, число РИЭ невелико, однако при появлении у них габаритных параметров число РЭИ заметно возрастало.

На рисунке 2а, представлена карта, отображающая четыре одинаковых ориентиров в виде красных прямоугольников. Одинаковые РЭИ выделены одним и тем же цветом. Была предпринята попытка снизить число РЭИ путем проведения эксперимента, в котором РЭИ определялись по количеству и типу объектов без учета их расположения (рисунок 2б). В данном случае число РЭИ значительно снизилось.

Однако при небольшом увеличении числа ориентиров количество РЭИ сильно возросло (рисунок 2в), и в связи с этим было принято решение отказаться от определения института Келдыша, в котором в качестве вершин графа выступали РЭИ.

### **Заключение**

В данной статье описаны результаты предварительных исследований в разработке метода интерпретирующей навигации на основе построения когнитивной карты местности. Приведен список управляющих команд, проведен эксперимент, в ходе которого маршрут автономного мобильного робота задавался с помощью набора ИДД.

Выявленные ограничения по некорректному перемещению мобильного робота оказались связаны с удаленным расположением видимых относительно камеры и дальномеров ориентиров.

Дальнейшее направление исследования связано с добавлением большего числа команд и приведением их к единообразному виду.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nahavandi S. et al. A comprehensive review on autonomous navigation // ACM Computing Surveys. – 2022.
2. Yasuda Y.D., Martins L.E.G., Cappabianco F.A.M. Autonomous visual navigation for mobile robots: A systematic literature review // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2020. – Т. 53 - №1 – P. 1-34
3. Pershina J. S., Kazdorf S. Y., Lopota A. V. Methods of mobile robot visual navigation and environment mapping //Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2019. – Т. 55. – P. 181-188.
4. Cheng E. et al. Autonomous navigation by mobile robots in human enviroments: A survey // 2018 IEEE International conference on robotics and biometrics (ROBIO). – IEEE, 2018. – P. 1981-1986
5. Papachristos C. et al. Autonomous navigation and mapping in underground mines using aerial robots // 2019 IEEE Aerospace Conference. – IEEE, 2019. – P. 1-8
6. Huang Y. et al. Autonomous navigation of mobile robot in radiation environment with uneven terrain //International Journal of Intellegent Robotics and Applications. – 2023. – Т.7 – №3 – P. 497-509
7. Rosas F.G., Hoeller F., Schneider F.E. Autonomous robot exploration and measuring in disaster scenarios using behavior trees // 2020 IEEE 10th International Conference of Intelligent Systems (IS). – IEEE, 2020. – P. 469-474
8. Mascarich F. et al. Radiation source localization in gps-denied environments using aerial robots // 2018 International Conference of Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2018. – P. 6537-6544
9. Sokolov S. M., Boguslavsky A. A., Beklemishev N. D. IMPLEMENTATION OF INTERPRETIVE NAVIGATION USING VISION SYSTEM MODULES //Extreme Robotics. – 2019. – Т. 1. – №. 1. – P. 39-44.
10. George L., Mazel A. Humanoid robot indoor navigation based on 2D bar codes: Application to the NAO robot // 2013 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). – IEEE, 2013. – P. 329-335.

# АЛГОРИТМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УНИМОДАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫБОРОК ИЗ МУЛЬТИМОДАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЯДА<sup>3</sup>

Е.Д.Карепова<sup>1</sup>, В.С.Петракова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН,

*e.d.karepova@icm.krasn.ru, vika-svetlakova@yandex.ru*

Данные, представленные в виде временных рядов, являются основным предметом исследований во многих областях, таких как анализ финансовых рынков и производственных процессов, метеорология и гидрология, медицина и эпидемиология и т. д. Числовые временные ряды - это значения некоторых наблюдаемых параметров, привязанные к последовательным моментам времени, которые описывают поведение интересующей исследователя динамической системы. Важными проблемами, возникающими при анализе временных рядов, являются обнаружение аномалий, классификация и сегментация элементов ряда, задача обнаружения точек разладки (апостериорное обнаружение неоднородностей в структуре ряда), построение прогнозов [1-4].

Одной из трудностей, возникающих при анализе реальных данных, представленных в виде временных рядов, является многомодальность выборки, сформированной элементами ряда, то есть наличие нескольких мод в ее гистограмме [5]. На практике наличие многомодальности приводит к невозможности применения многих статистических критериев, выявления трендов, автокорреляций, стационарности и других свойств ряда или его частей. Ситуация усложняется, если многомодальность не объясняется сезонностью или, если некоторые моды близки друг к другу или выражены нечетко (см. примеры гистограмм на рисунках 2, 3). В рамках данной работы исследуется случай, когда многомодальность связана с влиянием разных наборов внешних условий на значения ряда. Мы предполагаем, что каждая мода сформирована некоторым набором внешних факторов, а последовательность элементов ряда, по сути, представляет собой набор из нескольких выборок с различными унимодальными

---

<sup>3</sup> Работа поддержана грантом РФФ 24-71-10022.

распределениями, близкими к нормальному. В этом случае актуальным является сопоставление каждого выделенного унимодального распределения определенному набору внешних условий.

Отметим, что обсуждаемая выше формулировка недостаточна освещена в литературе. Обзор исследований, посвященных аналогичной идее до 2008 года, можно найти в [6], где предложены два алгоритма машинного обучения для решения задач многоклассовой классификации с упорядоченными классами. В статье [7] обсуждается необходимость использования информации о мультимодальности внутри двух классов при ансамблевом обучении для бинарной классификации. Следует отметить, что цитируемые работы и ссылки в них относятся к сегментации данных, не представленных в виде временных рядов, то есть данных, не имеющих строгой последовательности. В недавней обзорной статье о методах классификации временных рядов в биомедицинских приложениях [8] приведены ссылки на работы, в которых свойство мультимодальности временного ряда используется в качестве дополнительного критерия для стандартных методов классификации его элементов. Было показано, что использование такого критерия способствует лучшему пониманию физической интерпретации получаемых классов.

В то же время, разделение последовательности элементов ряда на несколько унимодально распределенных выборок близко к задачам теории распознавания изображений, в которых алгоритмы сегментации гистограммы яркости изображения позволяют выделять слои, фон или даже границы объектов на изображении [9]. Как правило, методы, применяемые к многомодальным гистограммам яркости изображения, называются пороговыми. Место пороговых методов в теории распознавания изображений обобщено в недавней обзорной статье [10]. Однако в данном случае разработанные алгоритмы применяются к данным яркости набора пикселей, т.е. к выборкам, не являющимся временными рядами.

Если рассматривать постановку как поиск метода разделения временного ряда на заданное число подвыборок, без каких-либо ограничений на получаемые

датасеты, то задача близка к задаче кластеризации временных рядов. Наиболее полный обзор методов кластеризации рядов представлен в работе [11]. Указанный обзор включает как методы машинного обучения, так и нейросетевые подходы. Следует отметить, что ряд авторов, разрабатывая новые подходы к кластеризации временных рядов, формулируют тот же вопрос: как разделить ряд на выборки, обобщающие некоторые исходные свойства временных рядов? В статье [12] представлен подход к кластеризации временных рядов, основанный на признаках. В нём необработанные данные временных рядов сначала преобразуются в векторы признаков меньшей размерности с помощью алгоритма PCA, а затем к извлечённым векторам признаков применяется алгоритм  $k$ -средних. В другом примере автор работы [13] предлагает алгоритм для извлечения вектора признаков микросейсмического сигнала и его последующей кластеризации с использованием подхода  $k$ -средних.

Отметим, что если предположить нормальность распределения в каждой из результирующих выборок, полученных после кластеризации ряда, то формулировка нашей задачи близка к идее модели гауссовой смеси (Gauss Mixture Model - GMM) [14]. Алгоритм GMM применим к данным, имеющим многомодальное распределение, сформированное как смесь нормальных распределений. Алгоритм GMM определён, в основном, для выборок. Существует ряд современных работ по его применению к временным рядам. Например, в статье [15] предлагается новый алгоритм оптимизации GMM для кластеризации многомерных временных рядов, который определяет количество кластеров с помощью байесовского информационного критерия. Авторы работы [16] предлагают разреженную гауссовскую модель для кластеризации множества временных рядов. Предложенный алгоритм выполняет кластеризацию не между элементами ряда, а внутри множества рядов, находя похожие элементы.

Таким образом, анализ литературы показывает слабую представленность исследуемой нами области. Целью текущей работы является разработка алгоритма разделения ряда на длинные непрерывные сегменты, соответствующие каждой из мод, наблюдаемых на гистограмме. Предполагается,

что алгоритм должен игнорировать кратковременные отклонения от моды. То есть, по сути, предлагается двухуровневый классификатор элементов ряда: элемент принадлежит сегменту, сегменту присваивается определенный класс. Каждому классу соответствует пик на исходной гистограмме, построенной для всех элементов ряда. При этом предполагается, что алгоритм имеет минимум входной информации. Например, он должен определять, насколько длительными могут быть отклонения от моды, чтобы их можно было игнорировать. Основная идея алгоритма - сопоставить элементы ряда с одним пиком гистограммы как выборку из унимодального распределения. При этом распределение всех элементов ряда будет многомодальным. Предлагаемый двухуровневый классификатор учитывает временную природу ряда, то есть упорядоченность его элементов в отличие от выборки. В целом, мы не предъявляем требований к распределению в каждом классе, но в рамках данной работы мы рассматриваем критерий, работающий в предположении, что распределение данных в каждом классе близко к нормальному. Избавление от этого требования всё ещё находится в стадии разработки и является предметом будущих исследований.

Мотивацией для разработки алгоритма послужила работа с реальными нестационарными гетероскедастичными временными рядами. Примером такого ряда являются измерения концентрации загрязняющего вещества в атмосфере. Такие данные имеют циклы изменения концентрации от достаточно длительного фона до короткого периода повышенных и аномальных концентраций. Известно также, что при низкой (фоновой) концентрации загрязнителя точность датчиков систем мониторинга ниже, чем при высокой. Это приводит к тому, что некоторые отрезки наблюдений имеют малую дисперсию, а другие - высокую. Большое число участков с разным поведением формирует дополнительную моду в гистограмме распределения ряда.

В рамках доклада будет изложен предложенный авторами алгоритм. Более детальное описание алгоритма представлено в статье [17]. Будут представлены результаты исследования эффективности предложенного алгоритма на синтетических и реальных данных. Так, на рисунках 1-3 приведено сравнение

работ по разделению на классы синтетически сгенерированных бимодальных рядов (с известной классификацией) с помощью порогового метода и предложенного нами алгоритма.

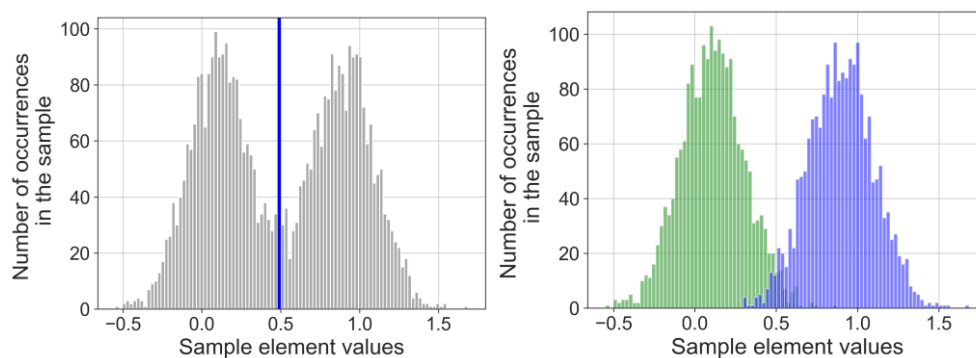


Рис. 1. Результат применения порогового алгоритма сегментации временных рядов (слева) и предложенного алгоритма (справа) к синтетически сгенерированным временным рядам с хорошо разделяемыми модами.

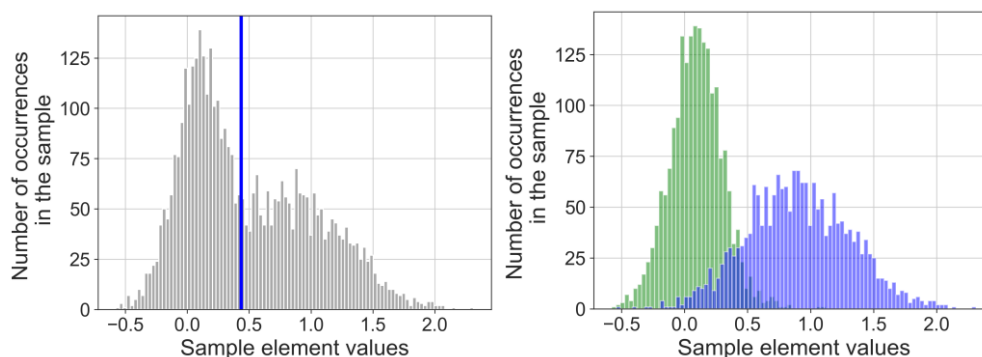


Рис. 2. Результат применения порогового алгоритма сегментации временных рядов (слева) и предложенного алгоритма (справа) к синтетически сгенерированным временным рядам с близко расположенными модами

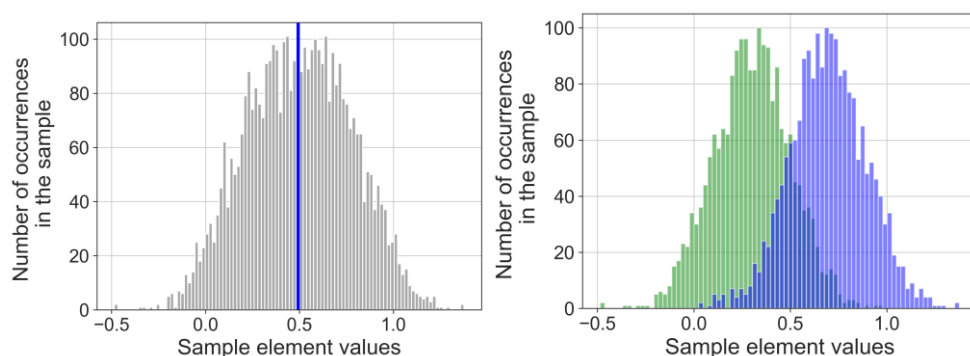


Рис. 3. Результат применения порогового алгоритма сегментации временных рядов (слева) и предложенного алгоритма (справа) к синтетически сгенерированным временным рядам с нечеткой модальностью

В таблице 1 показаны ошибки классификации для сравниваемых алгоритмов на синтетических данных, представленных на рисунках 1-3. Здесь под ошибкой понимается процент элементов выборки, которые классифицированы неверно. Сравнивалась работа трех алгоритмов, описание которых приведено в [17]: пороговый алгоритм Отцу; алгоритм классификации Дженкса; предложенный нами алгоритм.

Таблица 1. Доля элементов выборки, отнесенных к неправильному классу (процент, %) для синтетических данных, представленных на рисунках 1-3

| Алгоритм                 | Бимодальная выборка с                    |                                             |                                      |
|--------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
|                          | хорошо<br>разделимыми<br>модами (рис. 1) | близко<br>расположенными<br>модами (рис. 2) | нечеткой<br>модальностью (рис.<br>3) |
| Метод Отцу               | 2.53                                     | 8.25                                        | 15.73                                |
| Алгоритм<br>Дженкса      | 2.50                                     | 12.58                                       | 15.78                                |
| Предложенный<br>алгоритм | 0.00                                     | 0.60                                        | 0.23                                 |

Предложенный алгоритм был также протестирован и на реальных данных, представляющих собой измерения температуры и концентрации PM2.5. В докладе будет показано, что предложенный метод дал более физически верно интерпретируемый результат.

#### Список литературы

1. Aminikhanghahi S. A survey of methods for time series change point detection / S. Aminikhanghahi, D. Cook D // Knowledge and Information Systems. — 2017. — Vol. 51. P. 339–367.
2. Keogh E. Finding the most unusual time series subsequence: algorithms and applications / E. Keogh, J. Lin, S. Lee, H. Herle // Knowledge and Information Systems. — 2006. Vol. 11. — №1. P. 1–27.
3. Lovrić M. Algorithmic methods for segmentation of time series: An overview / M. Lovrić, M. Milanović, M. Stamenković // Journal of Contemporary Economic and Business Issues. — 2014. — Vol. 1. — №1. P. 31-53.
4. Zolhavarieh S. A Review of Subsequence Time Series Clustering / S. Zolhavarieh, S. Aghabozorgi, Y.W. Teh // The Scientific World Journal. — 2014. — Art. 312521.
5. Moraffah R. Causal inference for time series analysis: problems, methods and evaluation / R. Moraffah, P. Sheth, M. Karami M. // Knowledge and Information Systems. — 2021. — Vol. 63. P. 3041–3085.
6. da Costa J.F.P. The unimodal model for the classification of ordinal data / J.F.P. da Costa, H. Alonso, J.S. Cardoso // Neural Networks. — 2008. — Vol. 21 — № 1. P. 78-91.
7. Karpatne A. Ensemble learning methods for binary classification with multi-modality within the classes / A. Karpatne, K. Ankush, K. Vipin // Proceedings of the 2015 SIAM International Conference on Data Mining. Society for Industrial and Applied Mathematics. — 2015.
8. Wang W.K. A systematic review of time series classification techniques used in biomedical applications / W.K. Wang // Sensors. — 2022. — Vol. 22 — № 20. Art. 8016

9. Jardim S. Image thresholding approaches for medical image segmentation-short literature review / S. Jardim, J. António, C. Mora // *Procedia Computer Science*. — 2023. — Vol. 219. P. 1485-1492.
10. Sakshi A. Image segmentation techniques: statistical, comprehensive, semi-automated analysis and an application perspective analysis of mathematical expressions / A. Sakshi, V. Kukreja // *Archives of Computational Methods in Engineering*. — 2023. — Vol. 30 — № 1. P. 457-495.
11. Alqahtani A. Deep time-series clustering: A review / A. Alqahtani // *Electronics*. — 2021. — Vol. 10 — № 23. Art. 3001.
12. Guo C. Time series clustering based on ICA for stock data analysis / C. Guo, H. Jia, N. Zhang // 2008 4th international conference on wireless communications, networking and mobile computing. — 2021.
13. Xinhao Zh. Time series segmentation clustering: A new method for S-phase picking in microseismic data / Zh. Xinhao // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. — 2021. — Vol. 19. P. 1-5.
14. Tao H. Model selection for Gaussian mixture models / H. Tao, H. Peng, K. Zhang // *Statistica Sinica*. — 2017. P. 147-169.
15. Ryohei U. Time series clustering with an EM algorithm for mixtures of linear Gaussian state space models / U. Ryohei // *Pattern Recognition*. — 2023. — Vol. 138. Art. 109375.
16. Fotakis D. Efficient time-series clustering through sparse gaussian modeling / D. Fotakis, P. Patsilinakos, E. Psaroudaki, M. Xefteris // *Algorithms*. — 2024. — Vol. 17 — № 2. Art. 61.
17. Petrakova V. Algorithm for segmentation of multimodally distributed time series in accordance with their modes / V. Petrakova, E. Karepova // *Journal of Computational Science* [in publish]

# КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЛЕКСНАЯ КВАЛИМЕТРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ<sup>4</sup>

Ю. В. Коловский

Сибирский федеральный университет,

Институт инженерной физики и радиоэлектроники, базовая каф.

«Инфокоммуникации», [kolovskiuv@yandex.ru](mailto:kolovskiuv@yandex.ru)

В работе рассмотрена взаимосвязь *когнитивного моделирования* (КМ), *когнитивной комплексной квалиметрии* (ККК) и *когнитивных технологий* (КТ), по критериям: природоподобия, конвергентности, эмерджентности, высокого параллелизма, избыточности и т.п.; на основе практического опыта, на всех этапах «жизненного цикла» (ЖЦ), при создании и эксплуатации, *объектов искусственной природы* (ОИП), благодаря использованию КМ и ККК постепенно приобретающие разнообразные свойства автономности и самоадаптации. Методологические принципы КМ в значительной степени базируются на инструментарии единой системы метрологического обеспечения; методах и средствах когнитивной КК. **Цель работы:** анализ и обоснование эффективности создания и внедрения *адаптивных сенсорных сетей* (АСС), за счет накопленных избыточных технологических, информационных, структурных и т.п. ресурсов на всех этапах ЖЦ ОИП. **Результаты работы.** Показана высокая эффективность КМ, для решения проблем ОИП, на примере ККК экспертизы ОИП. Применения КМ и КТ, демонстрирует на практике рост надёжности, достоверности, эффективности новых инженерных решений. **Практическая значимость.** Инженерные решения КМ и внедрения АСС, доказали свою высокую эффективность, но повсеместно наблюдается избыточный рост потребления ресурсов. Ресурсосберегающие решения данной проблемы, как правило, получаются, за счет, декомпозиции ресурсов, локализации функционала, высокого параллелизма, аналогового ренессанса, природоподобия ... . **Обсуждение,** выводы и рекомендации. Первоочередная проблема —

---

<sup>4</sup> статья подготовлена по материалам научного обзора на тему «Когнитивные технологии: методологический базис преодоления сложности в инженерных науках» (проект РФФИ 20-18-50218\20)

ликвидация тотальной «интеллектуальной безграмотности». Когнитивный ликбез (КЛ) должен быть направлен на формирование образов «Учителя ИИ», в которых важны фундаментальные, профессиональные и специальные компетенции, для этой роли, в машинном обучении; мультидисциплинарным обучением ИИ, инструментарием КМ. Аппаратному обеспечению ОИП, недостаёт: высокого параллелизма (5G, 6G); АСС, обязательных в КТ, распознающие многомерные спектры функциональных свойств, для контроля ОИП.

***Ключевые слова:** аналоговый ренессанс, высокий параллелизм, избыточность, квалиметрия, когнитивное моделирование, конвергенция, природоподобие, эмерджентность*

**Введение.** Повсеместно, нарастают кризисные явления, оказывающие сингулярное влияние на научно-техническое развитие (НТР), связанные, с комплексом проблем методологического, научно-технологического, аппаратного, программного, ресурсного и др. обеспечения, создаваемой человечеством ОИП. Перспективные решения инженерной науки, обеспечивающие её развитие, во многом определяют информационные технологии, «цифровизация». КТ (гибридный ИИ), рассматриваемые в качестве основы цифрового развития, объективно доминируют, на современном этапе НТР. Рост количественных показателей и характеристик ведет к возрастанию сложности; к революционным изменениям, процессу смены парадигм, во всех сферах жизни. Появление аномалий — необъяснённых фактов, «непреодолимых» препятствий, происхождение которых, предопределено теоремой К. Гёделя о неполноте [1] доказывающей, что классические (аксиоматические) методы, лежащие в основе логического мышления, работают только в детерминистическом механическом мире»

В работе из множества трактовок интеллекта, используется принятая в кибернетике метафора «интеллект — модель окружающего мира» [2, ..., 4], т.е. форма, образ сущности. Актуален поиск путей минимизации неопределённости в поведении сложных инженерных объектов [4, ... 7]. Развитие инженерной науки

идёт по пути конвергенции, природоподобия, высокого параллелизма, постструктурализма взаимосвязей и процессов. Пример, иллюстрирующий конвергенцию различных базовых принципов показан на рис. 1. Когнитивная наука, проявляющаяся в том, что эффективные положения системного анализа, стандарты законодательной метрологии (единство, унификация, и т.п.) актуальны и развивают методологический базис когнитивного моделирования.

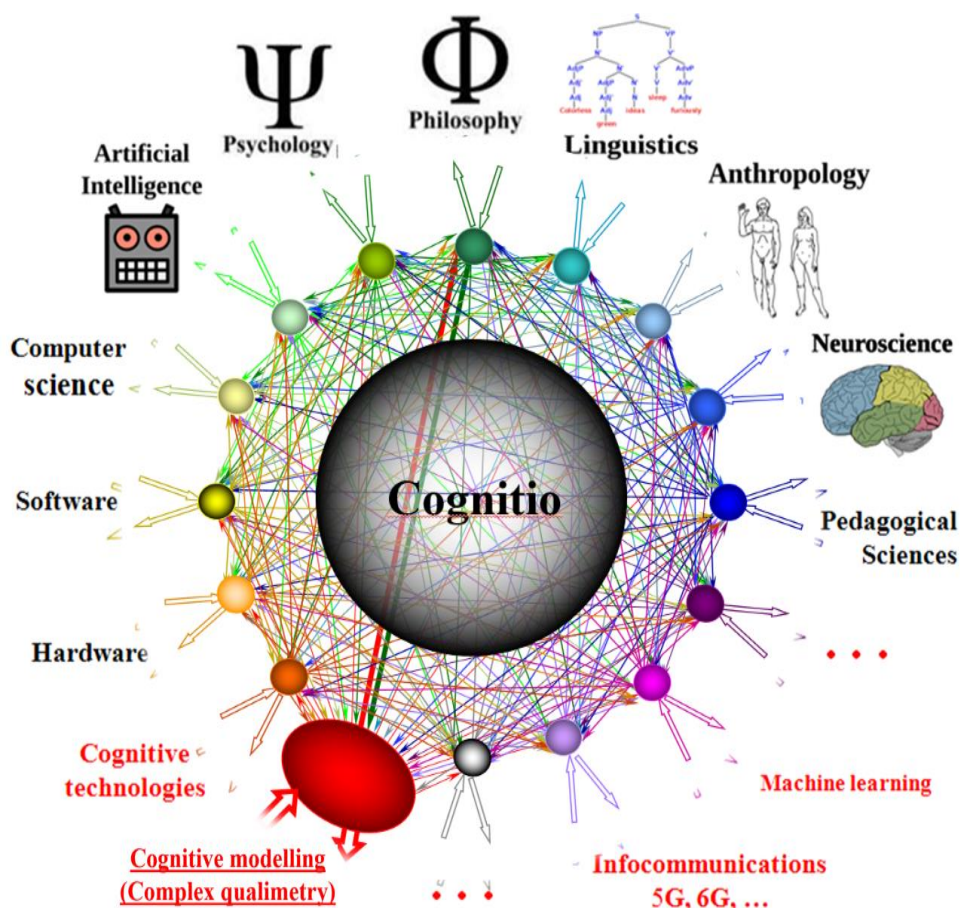


Рис. 1. Развитие структурных представлений о высоком параллелизме, (ризоморфизме)

Обзор, анализ и обоснование эффективности на всех этапах ЖЦ ОИП с АСС; методов формирования «учебников» для КМ, с результатами: компьютерного моделирования, контроля поведения, в процессе ЖЦ ОИП с АСС; обучения КМ. распознавания образов (многомерных сигналов различной физической природы), в направлении развития высокого структурного параллелизма (ВСП); на примере, космического аппаратостроения. Обоснование роли АСС в аппаратном обеспечении (Hardware), на всех этапах ЖЦ ОИП, с целью повышения качества результата, требует новых подходов в развитии

методов и средств: наблюдения (мониторинга), измерения (квалиметрии) и контроля (динамического управления) поведением, сложных инженерных объектов.

КМ и ККК, построены на основе методов и средств метрологии и квалиметрии, по критериям качества мониторинга, измерения, диагностирования, прогнозирования и контроля. В результате применения когнитивного моделирования и КТ в задачах распознавания образов произвольной природы, повсеместно наблюдается повышение надёжности, достоверности, правильности, воспроизводимости в различных условиях, для различных инженерных объектов.

Качество КМ повышает степень изоморфизма и понижает степень неопределённости образов реальности физической и информационной, обеспечивает высокоэффективными методами распознавания, образов [9, ..., 12]. Решаются проблемы качества: поиска, извлечения, переработки информации о реальности; обеспечения точности, достоверности, тождественности с реальностью физической. Конвергенция квалитологии и метрологии легли в основу квалиметрии, ресурс развития — мягкая «неряшливая» обработка данных, гибридный ИИ.

Качество обеспечивается высокоэффективными методами распознавания, ККК образов [13, ..., 20]. На протяжении длительного исторического периода в информационной реальности [21], проблемы поиска, извлечения, переработки информации, обеспечения её качества относились и относятся поныне к области метрологии. Конвергенция фундаментальных научных направлений квалитологии и метрологии легли в основу квалиметрии, главный ресурс развития, которой — мягкие (умные) измерения, мягкая «неряшливая» обработка данных, гибридный ИИ, представленные основоположниками в работах [22, ..., 27, и др.]. По данным Frontiers журналы публикующие материалы по КТ, охватывают, на принципах мультидисциплинарности, более 900 научных дисциплин. Объектом исследования является высокий структурный параллелизм (ВСП) в Hardware (аппаратное обеспечение); методы и средства: наблюдения

(мониторинга), измерения (квалиметрии) и контроля (динамического управления) поведением, сложных инженерных объектов.

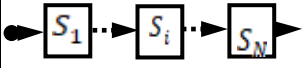
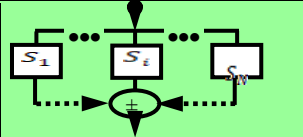
Сложные, труднопреодолимые проблемы в рамках системного анализа эмерджентность функциональной целостности, приводящая к существенному расхождению (неопределённости) между информационной и физической сущностью (сложностью) [22, ..., 25, 27, и др.]. Методологический базис когнитивного моделирования — ризомный анализ, в основание которого положены квалиметрические принципы и критерии: валидация, верификация ... опирающийся на презумпции постструктурализма. Природоподобие когнитивных технологий раскрывается в работе [28].

Когнитивная квалиметрия расширяет рамки классической метрологии, реализуется в новых направлениях, традиционно относимых к гуманитарной сфере: эконометрии, социометрии, психометрии и многих других, способствует развитию, совершенствованию, повышению эффективности КТ даёт возможность на новом витке развития, благодаря "неряшливым" методам обработки данных ("неряшливой аксиоматике"), нечёткой логике, "благословению размерности", постструктурализму, высокому параллелизму АСС, конвергенции, природоподобию преодолевать "сложность" инженерной науки. Высокий параллелизм АСС, это: параллельная система; параллельное программирование; параллельные алгоритмы; параллельные вычисления; параллельные, планарные технологии.

Роль и важное функциональное значение параллелизма наглядно демонстрируют базовые выражения относительных, эмерджентных отклонений (неопределённости, неполноты) описаний функциональных свойств произвольного объекта, называемые: в метрологии — относительными погрешностями -  $\delta_i$  (в информатике — ошибками); для каждого  $i$  структурного элемента и полной структуры объекта -  $\delta_\Sigma$ , описываются выражением

$$\delta_i = \frac{\Delta X_i}{X_i}.$$

Таблица 1. Взаимосвязь структуры и функциональной эффективности информационно-измерительных систем [29].

| №<br>п/<br>п | Тип<br>соединения | Структурная схема<br>соединения                                                   | Передаточная<br>функция   | Относительная погрешность<br>измерения $\delta_i = \frac{\Delta X_i}{X_i}$ |
|--------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| А            | Последовательное  |  | $S_A = \prod_{i=1}^N S_i$ | $\delta_{A\Sigma} = \sum_{i=1}^N \delta_i$                                 |
| В            | Параллельное      |  | $S_B = \sum_{i=1}^N S_i$  | $\delta_{B\Sigma} = \sum_{i=1}^N \delta_i \frac{S_i}{S_B}$                 |

Интегральные показатели качества объектов, имеющих по N структурных однотипных элементов, соединённых, последовательно (**А**), либо параллельно (**В**), отличаются до  $\leq N^2$  раз, формируют онтологический базис квалиметрии и когнитивного моделирования.

Проблемы когнитивной науки и КТ, связаны с многомерностью, мультидисциплинарностью, нацелены на обеспечение качества, снижение уровня ошибок функционирования, аппаратного обеспечение (Hardware), программного обеспечение (Software) и других составляющих жизненного цикла КТ. КМ, опираясь на постоянно подтверждаемую результатами инженерной деятельности, презумпцию постструктурализма «функция и структура ортогональны», в отличие от системного ориентировано на функциональную (смысловую) эффективность создаваемого продукта, при формировании структурных и коммуникативных решений.

Различные ресурсосберегающие технологии упрощения описания модели, снятия проклятия, от многообразия к поиску унифицированного (стандартного) образа, неизбежно приводящий к снижению её точности (качества), росту количества ошибок. При создании нового методического[30],

аппаратного [31] и программного [32] обеспечения доминирующими признаются принципы: ортогональности структурных решений и функциональных характеристик объекта [33]; высокого параллелизма за счёт полевого гибридного процессинга [34,35], постепенного вытеснения последовательной алгоритмизации и иерархичности структурных решений [36]; распространения коннекционизма [37], где структура – всё, свойства элементов структур – вторично; связанного с этим аналогового ренессанса (метаматериального пространства аппаратных решений; когнитивного интерфейса, не исключающего ошибок в информационном обеспечении, многоэтапном процессе размывания, искажения смыслов (информации) [38]. Доминирование свойств многомерных связей над свойствами выбранных элементов структур. Трансформация этапов ЖЦ техники и технологий [39, 40].

Структура мозга и гибридные искусственной нейронной сети (ГИНС) ризоморфны, каждая точка ризомы может и должна быть связана с каждой другой точкой, что несет в себе возможность бесконечного соприкосновения; в ризоме доминируют связи (отношения); ризома антигенеалогична и неиерархична; ризома - открытая сущность, которая может быть связана с чем-нибудь еще во всех ее измерениях; она разборка, обратима и восприимчива к непрерывной модификации.

Ещё одна актуальная проблема — реформирование, профессионального образования [41, 42], организация подготовки к новым профессиям, инклюзивная педагогика, обучение ГИНС [43, ..., 48].

Комплексное развитие когнитивных, в том числе: инклюзивных, конвергентных, паллиативных технологий, предполагает неизбежную адаптацию методологии организационной, теоретической и практической деятельности и всего арсенала, накопленных мультидисциплинарных инструментальных средств и ресурсов, для поиска ресурсосберегающего комплексного (мягкого) конвергентного решения инженерных проблем конкретного объекта, в первую очередь, снижение уровня ошибочных решений ИИ [49, 52].

**Заключение.** Аппаратное обеспечение АСС, воспринимающих

различные физические поля, и в первую очередь на основе фото и (или) видеоаппаратуры, в сочетании с ГИНС, позволяющими распознавать пространственно-временные спектры свойств технических объектов с целью управления их поведением. В связи с появлением в жизни людей КМ и КТ; нужен тотальный Ликбез. Ликвидация тотальной «машинной интеллектуальной безграмотности» (когнитивный ликбез), в основе которых лежит обучение искусственного интеллекта (ИИ); по мнению основоположников и современных, лучших профессионалов в этой сфере. Традиционные профессии «умирают», их место активно, с нарастающей скоростью, занимают когнитивные технологии; когнитивный ликбез должен быть направлен на формирование «образа новых профессий», в которых для человека важны фундаментальные, базовые, профессиональные, специальные компетенции, чтобы выступить в роли «Учителя» ГИНС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurt Gödel. The consistency of the axiom of choice and of the generalized continuum-hypothesis with the axioms of set theory. (Lectures delivered at the Institute for Advanced Study 1938–1939; notes by George W. Brown.) Annals of Mathematics studies, no. 3. Lithoprinted. Princeton University Press, Princeton 1940, 66 pp.
2. Ильин А.Д., Коловский Ю.В. Когнитивное моделирование - инструмент создания онтологий комплексного контроля в прикладных исследованиях // Сб.: Философия сознания и языка. Мат. II Всерос. науч. конф. Красноярск, СФУ. 2024. С. 96-112.
3. Коловский Ю.В. Методика оценки эффективности квалитетических технологий в когнитивной радиосвязи // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 11. С. 248-252.
4. Коловский Ю.В. Методология когнитивного контроля поведения сложных технических систем // В кн.: Сложные системы в экстремальных условиях. Мат. XVIII Всерос. симпози. с междунар. уч. Красноярск, СФУ; 2016. С. 46.
5. Сухарев Е.Н., Коловский Ю.В. Метод определения натяжения сетеполотна

- антенн на основе распознавания образов // Вест. СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева. 2006. № 1 (8). С. 96-100.
6. Bikeev E.V., Vilkov Y.V., Kolovskiy Y.V. u.a. Spacecraft reflector shape control // В сб.: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. С. 12031.
  7. Коловский Ю.В. Комплексная архитектура онтологий // В кн.: Сознание, тело, интеллект и язык в эпоху когнитивных технологий. Мат. I-ой Всерос. конф. Пятигорск, 2023. С. 86-88.
  8. Об утверждении номенклатуры научных специальностей ... / Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 24 февраля 2021 г. № 118
  9. Барцев С.И., Коловский Ю.В., Охонин В.А., Хлебопрос Р.Г. Возможности физической реализации быстродействующих нейросетевых микропроцессоров // В сб.: Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий. Мат. Межд. конф. 2000. С. 68-72.
  10. Моренко П.В., Коловский Ю.В. Полевой нейропроцессор // В сб.: Современные проблемы радиоэлектроники. Сб. науч. тр. Всерос. НТК. 2 Красноярск, СФУ. 2013. С. 343-347.
  11. Бикеев Е. В., Коловский Ю. В. Конвергентные технологии в когнитивной радиосвязи // Системы связи и радионавигации: мат. II Всерос. НТК.; НПП «Радиосвязь». Красноярск, 2015. С. 253-256.
  12. Бикеев Е.В., Коловский Ю.В. Орбитальный контроль эксплуатационных характеристик антенн с крупногабаритными рефлекторами космических аппаратов//Решетневские чтения. 2015. Т.1. С.72-74.
  13. Коловский Ю.В. Методы повышения точности определения некруглости крупногабаритных деталей /Ю.В. Коловский, //Метрология.- 1974.- N11.- С.11-17.
  14. Коловский Ю.В., Никандров Ю.В., Трутень В.А. Прибор для определения некруглости детали и положения оси вращения планшайбы // Станки и

- инструмент. - 1977.- №5.- С.11-13.
15. Коловский Ю.В. Методика построения базовых цилиндрических поверхностей (Отчет по НИР) / Ю.В. Коловский, // ОТЧЕТ по НИР - Н гос. регистр. 77054936; инв.Н Б675863.- Красноярск, 1978.- 15с
  16. Коловский Ю.В. Устройство для измерения некруглости крупногабаритных цилиндрических деталей / Ю.В. Коловский, Трутень В.А. // А.с. 697805 СССР.(51) МКИ.G 01 В 7/18.- N1594317/18-18; Оpubл.15.11.79, Бюл. N 41.- 1с.
  17. Гекк П.И. Измерение уступов поверхности методом многоволновой интерферо-метрии / П.И. Гекк, Ю.В. Коловский, Н.П. Шестаков и др. // Тез Всес. конф. "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение" / ВНИИОФИ.- М.,1988.-С.189.
  18. Коловский Ю.В. Метрологические аспекты исследования поверхностей / Ю.В. Коловский, // Сб. "Микроэлектронные устройства. Проектирование и технологиями /КРПИ.- Красноярск.- 1988.- С.31-40.
  19. Коловский Ю.В. Метрологическое обеспечение управления формой поверхности / Ю.В. Коловский, // Сб. "Пространственные конструкции в Красноярском крае.- Красноярск, 1993.-С.193-200
  20. Коловский Ю.В. Радиосистемы специального назначения для управления конструкциями / Ю.В. Коловский, // Сб. "Пространственные конструкции в Красноярском крае.- Красноярск, 1994.-С.184-198
  21. Чуринов Н.М. Реальности: физическая и информационная / монография / Н. М. Чуринов.// Красноярск, 1995. – 223 с.
  22. Галушкин А. И. Синтез многослойных систем ... . — М.: «Энергия», 1974.
  23. Werbos P. J., Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. (За пределами регрессии: новые инструменты для прогнозирования и анализа в поведенческих науках). Ph.D. thesis, Harvard University, Cambridge, MA, 1974.
  24. Барцев С. И., Охонин В. А. Адаптивные сети обработки информации. Красноярск: Ин-т физики СО АН СССР, 1986. Препринт N 59Б. — 20 с.

25. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J., Learning Internal Representations by Error Propagation. In: Parallel Distributed Processing (Изучение внутренних представлений путем распространения ошибок. В: Параллельная распределенная обработка), vol. 1, pp. 318—362. Cambridge, MA, MIT Press. 1986.
26. Барцев С. И., Гилев С. Е., Охонин В. А., Принцип двойственности в организации адаптивных сетей обработки информации, В кн.: Динамика химических и биологических систем. — Новосибирск: Наука, 1989. — С. 6-55.
27. Горбань А. Н. Обучение нейронных сетей. — М.: СП ПараГраф, 1990.
28. Kolovskaya A.Y. Artificial Intelligence and the Language of Science in the Complexity Paradigm / A.Y. Kolovskaya, Y.V. Kolovskiy // Mat. CAICS 2020: National Congress on Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics
29. Коловский Ю.В. Метрология, стандартизация и технические измерения: / Ю.В. Коловский, // Учебник для вузов / Гриф МОН: ИПК СФУ, Красноярск 2009. — 432с.
30. Барцев С.И., Нейроинформатика в управлении и технической диагностике / С.И. Барцев, Ю.В. Коловский, Ю.П. Ланкин, В.А. Охонин, В.П. Тен // VII Всероссийская конференция «Н КП-2001».- М.: ИПРЖР, 2001.- с. 371-375.
31. Еремин Н.И. Создание аналоговых нейропроцессоров на основе алгоритма самостоятельной адаптации / Еремин Н.И., Ю.В. Коловский, Ю.П. Ланкин, В.П. Тен // VII Всероссийская конференция «Н КП-2001».- М.: ИПРЖР, 2001.- С. 482-486.
32. Еремин Н.Н. Программный комплекс для проектирования аналоговых нейронных сетей / Н.Н. Еремин, Ю.В. Коловский, Ю.П. Ланкин, В.А. Охонин, Д.И. и др. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001610734. // М.: зарегистр. 15.06.2001.
33. Коловский Ю.В. Методология когнитивного контроля поведения сложных технических систем / Ю.В. Коловский, // Сложные системы в экстремальных

- условиях : Докл. XVIII Всерос. симпозиума с междунар. участием – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. С. 46. ISBN 978-5-7638-3531-1
34. Коловский Ю.В. Полевой нейропроцессор / Ю.В. Коловский, Моренко П. А. // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. Тр.- Красноярск: ИПК СФУ, 2013, С. 415-420.
35. Коловский Ю.В. Квалиметрическое обеспечение жизненного цикла радиотехнических комплексов / Ю.В. Коловский, // Системы связи и радионавигации: сб. тр. / науч. ред. акад. В.Ф. Шабанов – Красноярск: ОАО «НПП «Радиосвязь», 2014. – С. 118 – 120
36. Барцев С.И. Моделирование полносвязных нейронных сетей в задачах последовательной обработки сигналов / С.И. Барцев, Ю.В. Коловский, Охонин В.А., Д.С. Овчинников и др. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001610735. // М.: зарегистр. 15.06.2001.
37. Барцев С.И. Нейросетевой ренессанс вакуумных микротехнологий / С.И. Барцев, Ю.В. Коловский, Н.М. Еремин и др. // Материалы междунар. Конф. “Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий”/ Часть – Москва: НИИ «Авто-электроника», 2000, С.44-48.
38. Коловская А.Ю. Дополненная реальность: философские аспекты технологии, реализующей восприятие, распознавание и идентификацию визуальных, акустических и др. образов сложных динамических объектов / А.Ю. Коловская, Ю.В. Коловский // Мат. II Конгресс русского общества истории и философии науки/ 27-29 ноября 2020/ СПбГУ Санкт-Петербург: — С. 23-36.
39. Gorban, A.N.; Grechuk, B.; Mirkes, E.M.; Stasenko, S.V.; Tyukin, I.Y. High-Dimensional Separability for One- and Few-Shot Learning. Entropy 2021, 23, 1090. <https://doi.org/10.3390/e23081090>
40. Функциональная диагностика и управление крупногабаритными конструкциями и оболочками (Отчет по НИР) / Ю.В. Коловский, С. Г. Войт, Д.В. Иванов, В. А. и др. // ОТЧЕТ итоговый (2006-2008) по проекту РФФИ

- 06-08-01343-а / Руководитель Ю.В. Коловский, 2009. 126 с., [http://193.233.79.247/forms/2009/print\\_all.asp](http://193.233.79.247/forms/2009/print_all.asp)
41. Wasserman P. D. Experiments in translating Chinese characters using backpropagation. Proceedings of the Thirty-Third IEEE Computer Society International Conference — Washington: D. C.: Computer Society Press of the IEEE, 1988.
42. Коловский Ю.В. Индивидуальный подход как фактор развивающего обучения / Ю.В. Коловский, // Мат. межвузов. научн. конф. "Новые технологии обучения и реализация ГОС в технических вузах" / КГТУ.- Красноярск, 1995.- С.28-30.
43. Миркес Е. М., Нейрокомпьютер. Проект стандарта. — Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1999. — 337 с.
44. Коловский Ю.В. Формирование обучающих паттернов для задач нейросетевого моделирования электрических характеристик зеркальных антенн / Ю.В. Коловский, Д.И. Русов, А.В. Сарафанов, В.П. Тен // Свидет. о рег. программы для ЭВМ № 2000610736, зарегистр.11.08.2000.
45. Коловская Л.В. Креативный потенциал самоконфигурирования образовательной среды в философии постмодерна /Л. В. Коловская, Ю.В. Коловский // Материалы междунар. Конфер. По проблемам образования, С.-Пб., Изд-во СпбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. С.83-87.
46. Deep learning / LeCun, Yann, Bengio, Yoshua & Hinton, Geoffrey // Nature volume521, pages436-444 (2015) 2015/05/01 <https://www.nature.com/articles/nature14539#citeas>. DOI:10.1038/nature14539.
47. Коловская А.Ю. Artificial Intelligence and the Language of Science in the Complexity Paradigm / А.Ю. Коловская, Ю.В. Коловский // Мат. CAICS 2020: National Congress on Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics
48. Коловская А.Ю. ГЛАВА 4. Информационная дополненная реальность и сложность языка науки / Коловская А.Ю., Ю.В. Коловский // Сложные системы: целостность, иерархия, идентичность. Колл. монография. —

Красноярск: СФУ, 2020. – 238 с.

49. Gibbs J. W., Elementary Principles in Statistical Mechanics, developed with especial reference to the rational foundation of thermodynamics, (New York: Dover Publications, 1960 [1902])
50. Rosenblatt F., Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms, Spartan Books, 1962.
51. Tyukin I.Y, Gorban A.N., Sofeykov K.I., Romanenko I. Knowledge transfer between artificial intelligence systems. Front. Neurorobot. 2018. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2018.00049>. arXiv :1709.0154.
52. Gorban A.N., Makarov V.A., Tyukin I.Y. The unreasonable effectiveness of small neural ensembles in high-dimensional brain / Physics of Life Reviews 29 (2019) 55–88

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ РЕКОМБИНАЦИИ КСЕНОНОВОЙ ПЛАЗМЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ФОТОИОНИЗАЦИИ АТОМОВ КСЕНОНА

Н.И. Косарев

Сибирский федеральный университет,

Институт цветных металлов, *kosarev\_nikolai@mail.ru*

В работе методом численного моделирования исследуется кинетика формирования ксеноновой плазмы при фотоионизации атомов согласно двухступенчатому процессу. На первом шаге лазер накачки возбуждает верхнее состояние резонансного перехода ( $\lambda_1 = 882 \text{ нм}$ ) в атоме ксенона. На втором шаге действие лазерного излучения с энергией кванта превышающей энергию ионизации с уровня  $6p[5/2]_3$  ( $\lambda_2 = 514 \text{ нм}$ ) приводит к ионизации атомов, рис.1. В эволюции ксеноновой плазмы можно выделить два временных масштаба. Первый временной масштаб ограничивается характерными временами действия импульсов лазера накачки и ионизирующего лазера в двухфотонном процессе. За время действия лазеров происходит нагрев электронов от начальной величины  $T_e \geq 0.1 \text{ К}$  на несколько порядков благодаря их рекомбинации в трехчастичных процессах [1, 2]. На этом временном масштабе, когда расширением плазменной капли можно пренебречь, изучено влияние рекомбинационного нагрева электронов. На временах  $t \geq 1 \text{ мкс}$  исследована рекомбинация фотоплазмы при адиабатном расширении плазменной капли.

Была построена модель скоростных уравнений баланса для трехуровневого атома ксенона, рис.1. Время жизни метастабильного  $6s[3/2]_2$  состояния атома ксенона составляет 43 сек и оно служит в качестве основного состояния атома. Плотность населенности этого уровня в модели обозначена за  $N_1$ . Уровень  $6p[5/2]_3$ , возбуждаемый лазерным излучением на длине волны  $\lambda_1 = 882 \text{ нм}$ , обозначен за  $N_2$ . С этого уровня атомы ионизовались лазерным излучением с  $\lambda_2 = 514 \text{ нм}$ . Сечение фотоионизации с уровня  $6p[5/2]_3$ , вблизи пороговой длины волны  $\lambda_{th} = 515 \text{ нм}$  рассчитывалось по методу [3] и составило

$\sigma_{th} = 29.8 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ . Скоростные уравнения баланса для плотности населенности  $N_1, N_2$  электронной плотности  $N_e$ , и уравнение для электронной температуры  $T_e$  имели следующий вид:

$$dN_1/dt = -P_{12} N_1 + P_{21} N_2 + A_{21} N_2 + (K_{21} N_2 - K_{12} N_1) N_e + \beta_{rec} N_e^2 \quad (1)$$

$$dN_2/dt = P_{12} N_1 - P_{21} N_2 - A_{21} N_2 + (K_{12} N_1 - K_{21} N_2) N_e - W_{2c}^{(ph)} N_2 \quad (2)$$

$$dN_e/dt = W_{2c}^{(ph)} N_2 - \beta_{rec} N_e^2 \quad (3)$$

$$dT_e/dt = 2/3(K_{21} N_2 - K_{12} N_1) \Delta E_{21} + (2/3 E_1 + T_e)(\beta_{rec} N_e). \quad (4)$$

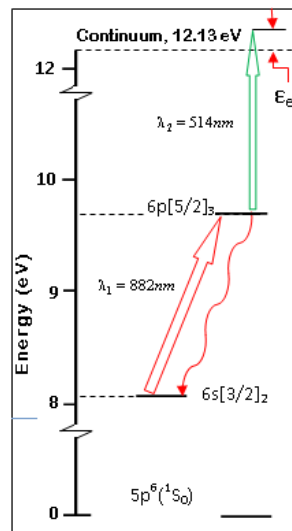


Рис. 1. Диаграмма уровней ксенона.

В уравнениях (1) – (4) использованы следующие обозначения:  $P_{12}$  и  $P_{21}$  – вероятности радиационного фотовозбуждения основного и фототушения возбужденного уровней,  $P_{12} = B_{12} \cdot \bar{J}(r,t)$ ;  $P_{21} = B_{21} \cdot \bar{J}(r,t) + A_{21}$ , в которых  $B_{12}$ ,  $B_{21}$  и  $A_{21}$  – коэффициенты Эйнштейна для вероятностей вынужденного возбуждения, тушения и спонтанного распада возбужденного состояния;  $\bar{J}(r,t)$  представляет собой среднюю по телесным углам и частоте интенсивность излучения;  $K_{12}$  и  $K_{21}$  – коэффициенты реакций возбуждения и тушения состояния электронным ударом;  $W_{2c}^{(ph)}$  – вероятность фотоионизации с уровней

2;  $\beta_{rec} [cm^3/c]$  – коэффициент реакции трехчастичной рекомбинации;  $\Delta E_{21}$  – разность энергий между уровнями 2 и 1. Начальные условия при  $t=0$  для уравнений (1)–(4) для плотности населенностей уровней и температуры следующие:  $N_1(r, 0) = N_0$ ,  $N_2(r, 0) = 0$ ,  $N_e(r, 0) = 0$ ;  $T_e(r, 0) = \varepsilon_{el}$  где  $N_0$  – начальная плотность атомов ксенона, а  $\varepsilon_{el}$  – начальная энергия электронов.

Уравнения (1)–(4) представляет собой систему интегро–дифференциальных уравнений. Эта система уравнений дополнялась уравнением переноса излучения, которое учитывало поглощение лазерного излучения на длине волны  $\lambda_1 = 882 \text{ нм}$  и внутренние источники фотонов в среде. Лазер накачки и ионизирующий лазер имели следующую зависимость от времени и частоты:

$$I_L(\nu, t) = I_0^{\max} \cdot \frac{(\Delta\nu_L/2)^2}{(\nu - \nu_L)^2 + (\Delta\nu_L/2)^2} \cdot \frac{t}{\tau_p} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_p}\right), \quad (5)$$

где  $\tau_p$  – эффективная длительность лазерного излучения;  $I_0^{\max}$  – максимальная интенсивность на центральной частоте линии  $\nu_L$ ;  $\Delta\nu_L$  – частотная ширина лазерного излучения;  $\nu_L$  совпадала с частотой атомного перехода  $\nu_0$ . Временная форма ионизирующего лазера имела вид (5), а его частотная форма моделировалась дельта–функцией. Геометрия среды моделировалась в форме 3D цилиндра, а численный метод решения системы интегро–дифференциальных уравнений приведен в работе [4].

Рис. 2а показывает начальную стадию процесса двухступенчатой ионизации для зависимости от времени температуры электронов, при различной начальной их величине  $\varepsilon_{el} = 0.1 \text{ К}$  ( $8.6 \times 10^{-6} \text{ эВ}$ );  $1.0$  ( $8.6 \times 10^{-5}$ );  $10$  ( $8.6 \times 10^{-4}$ ) (кривые 1–3). Эффективные длительности излучения лазера накачки и ионизирующего лазера составляли  $\tau_{p1} = \tau_{p2} = 4 \text{ нс}$ ;  $N_0 = 2.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Температура атомов задавалась величиной  $T_a = 5 \text{ К}$ . Начальная оптическая толщина паров ксенона вдоль диаметра цилиндра составляла  $\tau_0 = 5$ .

Интенсивность лазера накачки составляла  $J_{01} = 80 \text{ Вт} / \text{см}^2$ , а ионизирующего  $J_{02} = 2.15 \times 10^5 \text{ Вт} / \text{см}^2$ . К моменту времени  $t \approx 5 \text{ нс}$  все кривые сходятся к величине  $T_e \approx 10 \text{ К}$ , а в дальнейшем увеличение электронной энергии происходит одинаковым темпом для всех кривых 1–3. Увеличение температуры электронов обязано рекомбинационному нагреванию и объясняется температурной зависимостью коэффициента  $\beta_{\text{rec}} = 8.85 \cdot 10^{-27} \{T_e [\text{eV}]\}^{-9/2} N_e$  [5]. В соответствии с последней формулой, чем меньше  $T_e$ , тем быстрее рекомбинируют два электрона с ионом. Получаемый при этом атом ксенона тут же ионизуется лазерным фотоном и снова вступает в тройную рекомбинацию с электронами, которые уже увеличили свою энергию от лазерного фотона в предыдущем акте рекомбинации. Следовательно, набор энергии для электронов происходит тем быстрее, чем ниже их начальная температура. Рост температуры для кривой 1, соответствующей начальной энергии  $\varepsilon_{el} = 0.1 \text{ К}$ , за время  $\approx 10 \text{ нс}$  составил более чем 2 порядка. Нагревание электронов за время действия лазеров накачки и ионизирующего лазера происходит за счет рекомбинационного нагрева, поскольку сверхупругий нагрев, как показали оценки, увеличивает температуру электронов лишь в два раза [2].

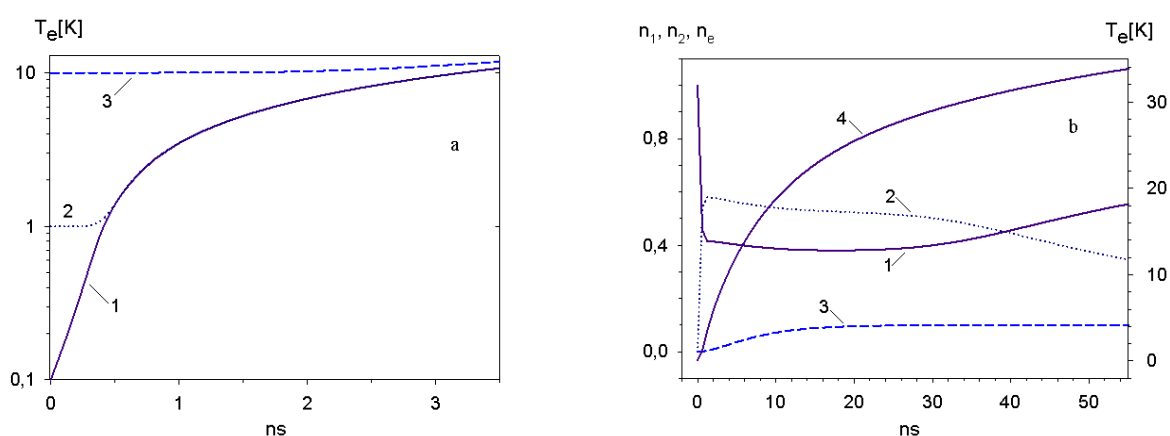


Рис.2. Кинетика ионизации и нагрева электронов.

Рис.2б дает зависимости от времени нормализованной плотности населенности атомов ксенона в метастабильном состоянии  $n_1 = N_1 / N_0$  (кривая

1) и на возбужденном уровне  $n_2 = N_2 / N_0$  (кривая 2). Кривая 3 показывает динамику нормализованной плотности электронов  $n_e = N_e / N_0$ . На вспомогательной (правой) оси приводится динамика температуры электронов (кривая 4). При таких параметрах модели проионизовано 10% атомов. Лазерное излучение с  $\lambda_1 = 882 \text{ нм}$  заселяет уровень 2, кривая 2. Населенность основного уровня 1 уменьшается, кривая 1. Действие второго лазера приводит к фотоионизации атомов ксенона из возбужденного 2 состояния. Плотность электронов увеличивается, кривая 3. Температура электронов также возрастает, кривая 4. На временах, когда действие импульсов уже почти закончилось ( $t \approx 50 \text{ нс}$ ), плотность атомов на возбужденном уровне уменьшилось за счет спонтанного распада на основной уровень. Плотность электронов выходит на постоянное значение  $n_e \approx 0.1$ , температура электронов возрастает до величины  $T_e = 35 \text{ К}$  и имеет тенденцию на дальнейшее возрастание. Но уже при  $T_e \approx 35 \text{ К}$  и  $N_e = 2.0 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$  характерное время рекомбинации составит величину  $\tau_{\text{rec}} \approx 110 \text{ мкс}$ . Такое замедление времени рекомбинации обязано рекомбинационному нагреванию электронов за характерное время действия лазеров накачки и ионизирующего лазера.

С ростом температуры электронов плазменная капля начинает свободно расширяться в вакуум и охлаждается в адиабатном процессе. При расширении в плазме поддерживается гауссово распределение плотности ионов и время жизни плазмы составляет  $\approx 200 \text{ мкс}$ , как следует из работы [6]. Так температуре  $T_e = 35 \text{ К}$  соответствует скорость разлета  $v_h \approx 65 \text{ м / с}$ . В нашей модели капля имела вид цилиндра с диаметром основания равного высоте, размером в 1 см. Начальное распределение плотности атомов принималось однородным. Разлет капли моделировался с учетом того, что радиальная скорость и скорость расширения торцов цилиндра были одинаковы. Рассмотрение адиабатного расширения плазмы в вакуум дает зависимость температуры от объема в виде:  $T_e \approx 1/V^{2/3}$ , где  $V$  — текущий объем капли, [7]. Расширение капли

моделировалось зависимостью  $T_e = T_{e,0} V_0^{2/3} / V^{2/3}$  в правой части уравнения (4), где  $T_{e,0} = 35 \text{ K}$  температура, которую получают электроны при трехчастичной рекомбинации за время  $t \cong 100 \text{ нс}$ , а  $V_0$  начальный объем капли цилиндрической формы с высотой и диаметром в 1 см.

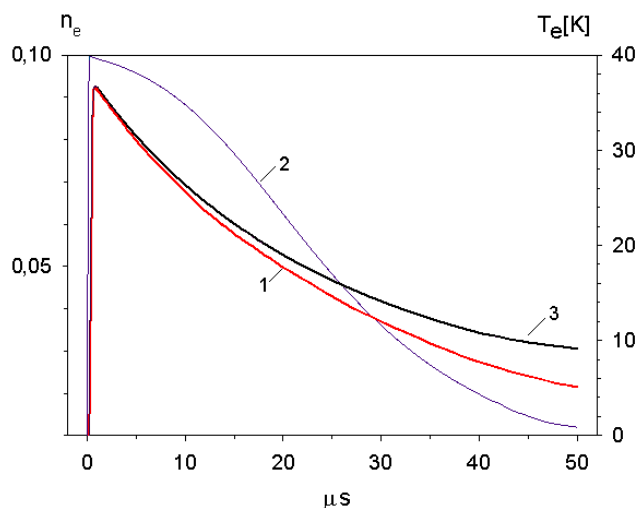


Рис. 3. Трехчастичная рекомбинация плазмы. Пояснения к кривым в тексте.

Расчетная зависимость температуры от времени разлета капли показана на рис.3 кривой 1. Согласно проведенным расчетам, адиабатное охлаждение капли начинается примерно с момента времени  $t \geq 2 \text{ мкс}$ . Далее к моменту времени  $t \approx 60 \text{ мкс}$  температура уменьшается до  $\approx 4 \text{ K}$ . При уменьшении электронной температуры начинают развиваться процессы трехчастичной рекомбинации и концентрация электронов падает. Расчетная зависимость динамики плотности электронов показана на рис. 3 кривой 2. Кривые 1,2 дают усредненные по объему среды величины, поскольку среда на атомном переходе к концу процесса рекомбинации электронов становится оптически плотной и наблюдалось небольшая неоднородность в распределение  $T_e$  и  $n_e$ . Таким образом, на временах процесса двухступенчатой ионизации атомов ( $\approx 10 \text{ нс}$ ) температура электронов увеличивается и рекомбинация плазмы замедляется. Так для температуры  $T_e = 35 \text{ K}$  время  $\tau_{rec}$  составит  $\approx 110 \text{ мкс}$ . Затем происходит адиабатное охлаждение плазменной капли из-за её разлета и время

рекомбинации опять уменьшается. Например, при  $T_e \approx 4\text{ K}$  время  $\tau_{rec}$  сокращается до величины  $\approx 10\text{ нс}$ , но плазма не связана и, расширяясь свободно в вакуум, живет лишь  $\approx 200\text{ мкс}$  [5].

Рекомбинация плазмы была исследована по интенсивности флуоресценции атомной линии ( $\lambda_1 = 882\text{ нм}$ ), считая среду оптически тонкой. Интенсивность флуоресценции можно оценить по формуле работы [2]:  $I_{fl} = g_2 / (4\pi(g_1 + g_2)) N^{at} A_{21} h\nu_0 d_0$ , где  $g_1, g_2$  – статвеса уровней атома;  $N^{at}(t) = N_0 - N_e(t)$  – полная плотность атомов;  $\nu_0$  – центральная частота атомной линии;  $d_0$  – диаметр плазмы. Если подставит в формулу все параметры ( $g_1 = 5, g_2 = 7, A_{21} = 0.3 \cdot 10^8\text{ с}^{-1}, \nu_0 = c / \lambda_1, d_0 = 1\text{ см}$ ), мы получим следующее выражение  $I_{fl} = 0.85 \times 10^{-12} N^{at}$ .

Электронная плотность  $N_e(t)$  уменьшается со временем из за трехчастичной рекомбинации в соответствии с экспоненциальной зависимостью  $N_e(t) = N_e^0 \exp(-\beta_{th} N_e(t) t)$ , где  $N_e^0$  – электронная плотность в начальный момент времени рекомбинации плазмы. Окончательно мы можем получить для интенсивности флуоресценции формулу:  $I_{fl} = I_0 (1 - n_e^0 \exp(-\beta_{th} N_e(t)))$ , где  $I_0 = 0.85 \times 10^{-12} N_0$ ,  $n_e^0 = N_e^0 / N_0$ . При рекомбинации плазмы, коэффициент при экспоненте  $(-\beta_{th} N_e(t))$  определяет угол наклона кривой зависимости интенсивности  $I_{fl}(t)$  от времени  $t$ . Мы определяем этот угол наклона, как  $\beta_{th} N_e = -\Delta \ln F(t) / \Delta t$ , где  $\Delta \ln F(t)$  приращение натурального логарифма функции  $F(t) = (1 - I_{fl}(t) / I_0) / n_e^0$  за приращение времени  $\Delta t$ . Затем, используя для коэффициента  $\beta_{th}$  выражение  $\beta_{rec} = 8.85 \cdot 10^{-27} \{T_e [\text{eV}]\}^{-9/2} N_e$ , можно получить зависимость от времени электронной температуры в виде:

$$T_e = \left( \frac{8.75 \times 10^{-27} (N_0 (1 - I_{fl} / I_0))^2}{-(\Delta \ln F) / \Delta t} \right)^{2/9} \quad (6)$$

Формула (6) позволяет извлекать электронную температуру из интенсивности флуоресценции. Эта зависимость показана кривой 3 на рис.3. Кривая 3 дает завышенное значение температуры электронов, что связано с ограниченностью модели оптически тонкой плазмы, используемой при выводе уравнения (6).

В заключение отметим, что результаты численного моделирования позволяют объяснить замедление рекомбинации ксеноновой плазмы, полученное в работе [6], рекомбинационным нагревом электронов. Поэтому пересмотр теории тройной рекомбинации, предложенный авторами этой работы, не требуется.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kosarev N.I. Three-body recombination of ultracold barium plasma created by two-step photoionization of atoms through an excited  $6s6p\ ^1P_1$  level / N.I. Kosarev // Physics of Plasmas. – 2022. – V.29, P.123509-1.
2. Kosarev N.I. Slowdown of the recombination of ultracold xenon plasma created by two-step photoionization of Xe-atoms / N.I. Kosarev // Physica Scripta. –2025. – V.100, No.7, P.075607–1.
3. Sobel'man I.I. An introduction to the theory of atomic spectra / I.I. Sobel'man. - Pergamon press, New York, 1972. – 605 p.
4. Косарев Н.И. Перенос резонансного излучения в газовых средах с нестационарной кинетикой / Н.И. Косарев // Математическое моделирование. – 2024. – Т.36, №5, С. 137.
5. Raiser Uu.P. Gas Discharge Physics / Uu.P. Raiser. –Springer, Berlin, 1997. – 449 p.
6. Killian T.S., Kulin S., Bergeson S.D., Orozco S.D., Rolston S.L. Creation of an Ultracold Neutral Plasma / T.S. Killian // Physical review letters. – 1999. – V.83, P.4776.
7. Dumin Yu.V. Characteristic feature of temperature evolution in ultracold plasmas / Yu.V. Dumin, Plasma physics reports, – 2011. – V.37, No.10, P.858.

# РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЕМЕРА

М.И. Малимонов<sup>1</sup>, О.Э. Якубайлик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук», *thelemoh@yandex.ru*

**Введение.** Основной задачей мониторинга состояния атмосферного воздуха является выявление факторов, негативно влияющих на его качество. Как показывают исследования [1-4], значительное воздействие на концентрацию загрязняющих веществ оказывают метеорологические параметры.

В настоящее время для работы с метеорологическими и климатическими данными разработано множество систем, применяющих различные методы визуализации. Многие из них опираются на данные глобальных моделей (таких как GFS или ECMWF), содержащих детальную информацию о состоянии атмосферы. Поскольку прямой показ всего массива смоделированных данных невозможен, ключевой задачей становится разработка эффективных механизмов их предобработки, передачи и отображения.

Для иллюстрации представлены две системы:

1. Система Ventusky использует серверную визуализацию, при которой для каждого параметра заранее подготавливаются монохромные карты. Клиентское приложение загружает эти легковесные изображения и применяет к ним цветовую палитру, что минимизирует трафик и ускоряет отклик интерфейса.
2. Система Windy, напротив, передает данные на клиент в формате JSON, где их визуализация (построение сетки и окрашивание) выполняется средствами браузера.

Таким образом, несмотря на технические различия, оба решения нацелены на достижение высокой производительности, что является обязательным требованием для интерактивной визуализации метеоданных.

В 2021 году в Красноярске был установлен температурный профилемер МТР-5. Стандартное программное обеспечение, поставляемое с оборудованием, имеет ряд ограничений: оно работает исключительно с локальными файлами, не поддерживает интеграцию с базами данных, не позволяет динамически обновлять информацию для анализа и обладает недостаточным уровнем интерактивности при работе с графиками.

Для эффективного анализа данных профилемера требуется новое приложение. Его ключевыми задачами являются:

1. Динамическая загрузка данных за произвольные временные интервалы.
2. Предоставление удобных инструментов для визуализации температурных инверсий.
3. Обеспечение полноценной интерактивной работы с графиками.
4. Реализация в виде веб-решения, не требующего установки на компьютеры пользователей.

Таким образом, целью данной работы является разработка веб-ориентированного программного обеспечения, которое устранил указанные недостатки и предоставит исследователям современный инструмент для анализа температурных данных.

**Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи отлично подходят веб-технологии. Были выбраны следующие инструменты и программное обеспечение: программная платформа Node.js, фреймворк Vue.js, графические библиотеки Plotly.js и Apache Echart, UI-компоненты Primevue и Naive-UI.

Node.js – Программная платформа на движке V8, написанная на C++, превращает JavaScript в язык общего назначения. Позволяет создавать сервера, компилировать проекты, есть свой менеджер пакетов для установки и публикации библиотек, является ядром практически всех проектов.

Vue.js – JavaScript-фреймворк с открытым исходным кодом для создания пользовательских интерфейсов. Во Vue.js реализуется шаблон

проектирования MVVM, что позволяет связывать данные и представления этих данных. При изменении данных в компоненте, данные автоматически обновляются в модели, и наоборот, если данные изменяются в модели – автоматически обновляется компонент. Для адаптации к большим проектам во Vue.js используются модульность. Существуют свои файлы со своим расширением «vue», которые хранят в себе разметку html, javascript-сценарии и стилистику. Данный фреймворк был выбран из-за простоты работы в нем.

Plotly.js – JavaScript-библиотека с открытым исходным кодом, которая была создана на основе D3.js. D3.js представляет собой набор инструментов для создания динамических визуализаций в веб-браузере, но не представляет готовые графические решения. Plotly.js как раз является оболочкой для D3.js, с множеством различных типов и видов графиков (линейные графики, тепловые карты, радиальные диаграммы и т.д.

Apache ECharts — это бесплатная библиотека для построения интерактивных диаграмм и графиков на JavaScript с открытым исходным кодом. Она разрабатывается при финансировании фонда Apache Software Foundation.

Веб-приложение работает с базой данных через специальное API, которое связано с базой данных, где хранятся все данные температурного профилемера с [5-7].

Внутри веб-приложения есть несколько блоков, которые отвечают за загрузку данных, формирование данных для отображения и локальное хранилище со стартовыми настройками. При взаимодействии с графическими оболочками их состояния записываются в локальное хранилище и на основе этих изменений обновляются данные для отображения. На рисунке 1 представлена схема обработки данных и дальнейшая передача данных в пользовательский интерфейс.

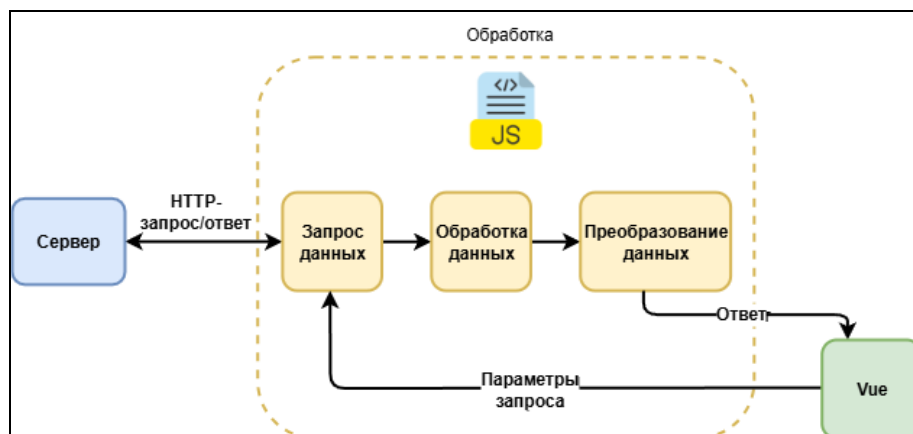
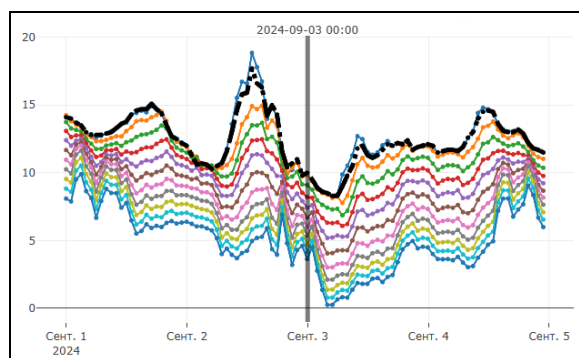
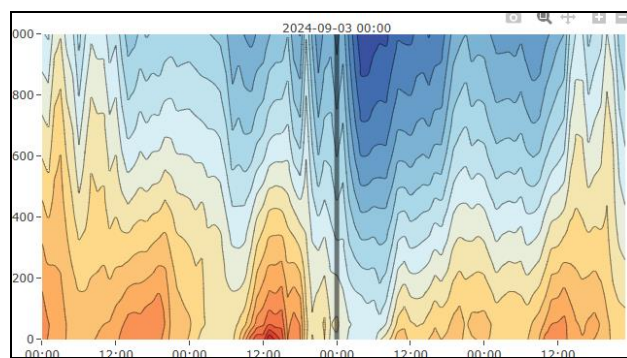


Рис 1. Обработка и передача данных для отображения в интерфейсе.

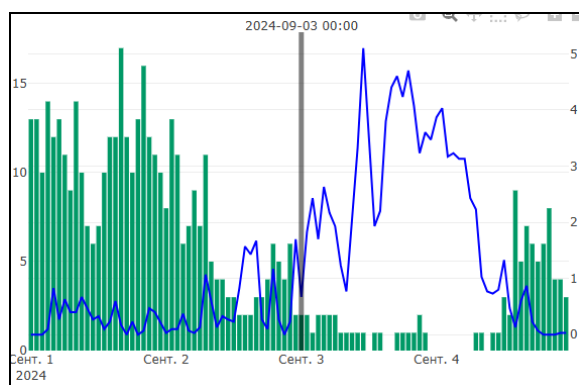
С помощью описанного выше программного обеспечения были созданы следующие продукты: «Данные температурного профилемера» и «Данные профилемера и GFS».



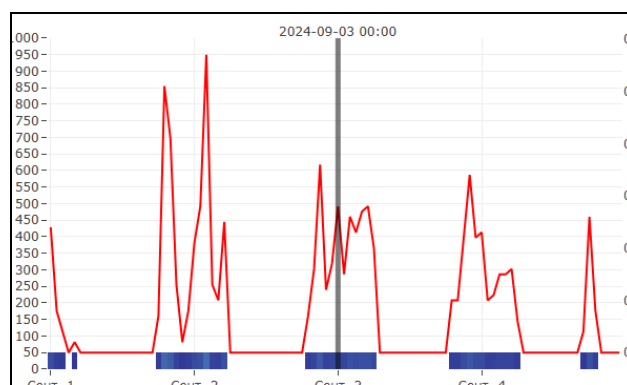
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис 2. Сформированные графики. Термограммы (а), температура атмосферы (б), загрязнение и скорость ветра (в), температурные инверсии (г)

**Продукты.** Веб-приложение «Данные температурного профилемера» для отображения и анализа данных температурного профилемера. Данное веб-приложение позволяет определить продолжительность температурной инверсии, прохождение холодных и теплых атмосферных фронтов и т.д. На рисунке 2 представлены примеры отображения данных.

Приложение «Данные профилемера и GFS» для обработки и анализа данных модели GFS и прибора МТП-5 позволяет значительно ускорить время обработки данных и проводить анализ в масштабе сезонов года. Внедрение дополнительных модулей позволяет получать различную полезную информацию о двух наборах данных прямо в окне браузера. На рисунке 3 представлены примеры отображения данных.

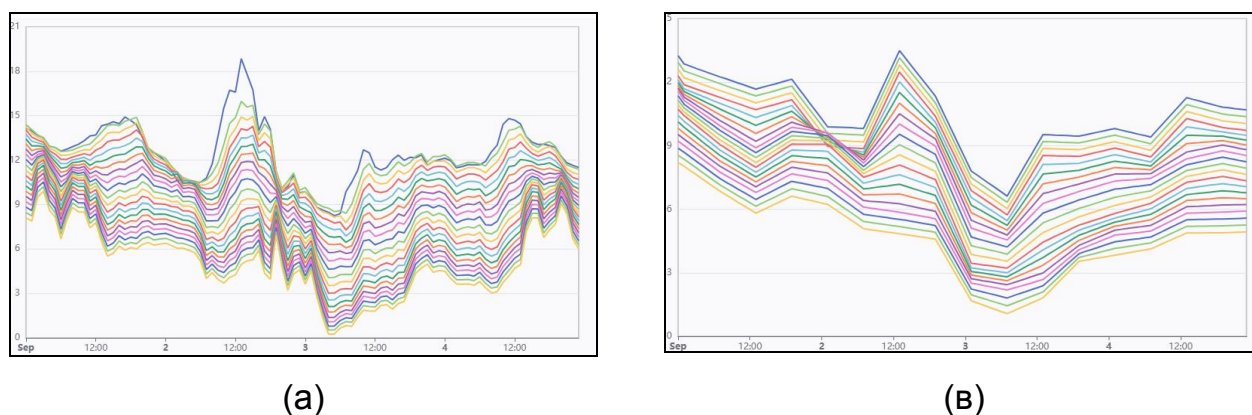


Рис 3. Сформированные графики. Термограммы температурного профилемера (a) и термограммы GFS (б)

Основной упор в этих приложениях сделан на отображение температурной инверсии. На рисунке 4 показана температурная инверсия с 19 декабря 2021г. по 30 декабря 2021г. На данном графике можно увидеть аномальную мощность инверсии в 25 градусов, также показана приподнятая и приземная инверсия.

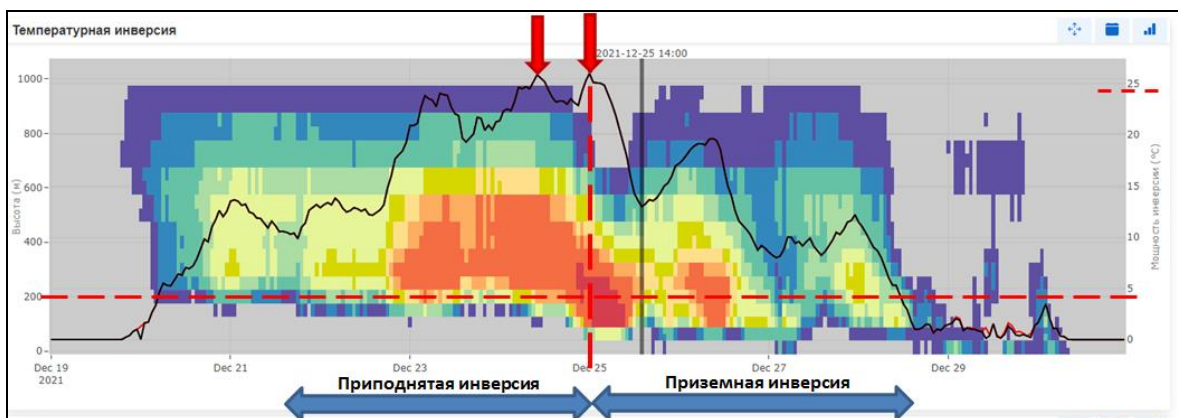


Рис. 4. Отображение приподнятой и приземной инверсии. Красные стрелки указывают на температурную инверсию в 25 градусов.

С помощью данных графика можно определить приподнятую и приземную инверсию, установить мощность температурной инверсии и на каких высотах наблюдается данный феномен.

**Заключение.** В результате этой работы было создано веб-приложение для отображения и анализа данных температурного профилемера. Данное веб-приложение позволяет определить типы термической устойчивости, продолжительность температурной инверсии, прохождение холодных и теплых атмосферных фронтов и т.д. Приведены схемы работы приложения и программные модули, отвечающие за формирования данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen J. A Parameterization of Low Visibilities for Hazy Days in the North China Plain / J. Chen, C.S. Zhao, N. Ma, P.F. Liu, T. Göbel, E. Hallbauer, Z.Z. Deng, L. Ran, W.Y. Xu, Z. Liang, H.J. Liu, P. Yan, X.J. Zhou, A. Wiedensohler // Atmos. Chem. Phys. - 2012. - № 12 - P. 4935–4950.
2. Lin M. Characterization of Regression Relationship between Recent Air Quality and Visibility Changes in Megacities at Four Haze Regions of China / M. Lin, J. Tao, C.Y. Chan, J.J. Cao, Z.S. Zhang, L.H. Zhu, R.J. Zhang // Aerosol Air Qual. Res. - 2012. - № 12. - P. 1049–1061.

3. Luvsan M. The Influence of Emission Sources and Meteorological Conditions on SO<sub>2</sub> Pollution in Mongolia / M. Luvsan, R. Shie, T. Purevdorj, L. Badarch, B. Baldorj, C. Chan // Atmos. Environ. - 2012. - № 61. - P. 542–549.
4. Заворуев В. В., Заворуева Е. Н., Грубенко Н. В. Влияние температуры и атмосферного давления на концентрацию взвешенных частиц в приземном воздушном слое поселков Дрокино и Минино (красноярский край) в зимний период // Тенденции развития науки и образования. 2020. №59. С. 23-27.
5. Кадочников А. А., Якубайлик О. Э. Разработка программных средств сбора и визуализации данных наблюдений для геопортала Института вычислительного моделирования СО РАН // Вестн. НГУ. Информационные технологии. 2014. 12, № 4. С. 23–31. 14.
6. Кадочников А. А. Особенности построения геопространственных веб-приложений и сервисов для систем мониторинга состояния окружающей
7. Малимонов М. И. Использование javascript-библиотек в подсистеме визуализации экологических данных // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН. 2020. С. 65.

# ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ<sup>5</sup>

В.С.Петракова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, *vika-svetlakova@yandex.ru*

Математические модели оптимального управления являются одним из эффективных инструментов описания социально-экономических процессов (см., например, работы [1,2]. В 2020–2022 годах, во время пандемии COVID-19, модели оптимального управления, как с ограничениями в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, так и с уравнениями в частных производных, стали широко использоваться как для построения прогнозов развития заболевания, так и для оценки последствий применения мер изоляции для населения.

Постановки задач в виде моделей оптимального управления в рамках эпидемиологии позволили исследователям учесть не только характеристики вируса (его контагиозность, смертность и т. д.), но и социально-экономическое описание региона. Под социальными факторами мы подразумеваем отношение населения к соблюдению противовирусных ограничений: насколько население готово или вынуждено соблюдать изоляцию, носить маски, вакцинироваться и т. д. Сюда же относится и так называемое «анархическое» поведение – саботаж мер изоляции в силу их экономической невыгодности для отдельно взятого агента. К экономическим факторам можно отнести ограниченность финансовых ресурсов, выделяемых на борьбу с эпидемией, что влечет за собой различные последствия в зависимости от степени распространения вируса [3].

Отметим, что использование моделей оптимального управления для описания эпидемиологического процесса является достаточно распространенным явлением. Существуют сотни работ, посвященных таким постановкам в эпидемиологии (см. например, недавние работы [4-6]. Основной проблемой использования таких моделей для прогнозирования развития динамических систем является определение функционала стоимости, который

---

<sup>5</sup> Работа поддержана грантом РФФ 23-71-10068.

должен, во-первых, описывать систему, т. е. быть физически релевантным, и, во-вторых, удовлетворять ограничениям на существование и единственность решения. Так, в работах [7,8] показана чувствительность прогноза, полученного с помощью модели оптимального управления «среднего поля», к виду функционала для описания распространения эпидемий [7] и распространения информации [8]. Для обеспечения существования и единственности модельной задачи функционал обычно рассматривается в квадратичной форме. Выполнение условий существования и единственности решения таких задач является серьезным препятствием для их использования для описания реальности, поскольку реальные процессы не являются симметричными. В данной работе предлагается формулировка, представляющая функционал модели как линейную комбинацию ее компонент, отвечающих за различное поведение системы, оставаясь в условиях существования и единственности решения прямой задачи. В этом случае скорость изменения функционала во времени определяет соответствие постановки задачи реально описываемому процессу и может быть выражена через числовые коэффициенты, которые восстанавливаются путём решения коэффициентной обратной задачи с использованием имеющегося набора реальных данных. В статье [9] обсуждаются применение такой формулировки к постановкам задач среднего поля и проблема, связанная с такой формулировкой. Для задач вычислительной эпидемиологии такие числовые коэффициенты связаны между собой соотношениями, определяющими как корректность описания эпидемической вспышки, так и существование и единственность решения задач. Это приводит к необходимости более детального изучения моделей оптимального управления, используемых для описания распространения эпидемии.

Для обоснования мотивации представленного исследования рассмотрим модель оптимального управления, которая может быть использована для решения задачи прогнозирования развития эпидемии, в следующем более общем виде. Будем искать непрерывную функцию  $r(t)$ ,  $t \in [t_0, t_T]$ , такую, что  $r(t)$  обеспечивает минимум функционалу  $F$  :

$$r(t) = \operatorname{argmin} F(r(t), \bar{y}). \quad (1)$$

Здесь  $F$  для задач вычислительной эпидемиологии — функционал системы, описывающей поведение популяции;  $\vec{y} = (y_1(t), \dots, y_n(t))^T$  — вектор непрерывно дифференцируемых функций  $y_i(t)$ , такой, что

$$\frac{d\vec{y}}{dt} = \vec{f}, \quad (2)$$

$$\vec{y}(0) = \vec{y}_0. \quad (3)$$

Здесь  $\vec{f} = (f_1(t, r, y_1, \dots, y_n), \dots, f_n(t, r, y_1, \dots, y_n))^T$ ,  $\vec{y}_0 = (y_{1,0}, \dots, y_{n,0})^T$ ,  $f_i(t)$  — непрерывно дифференцируемые функции,  $y_{i,0} \in R$ . Система (2),(3) определяет схему передачи вируса и может быть представлена в виде модели типа SIR [10].

Как уже упоминалось выше, при описании исследователем реальных данных результат решения задачи (1)-(3) существенно зависит от вида функционала  $F$ . В свою очередь, исследователи, во-первых, ограничены выбором функционала из-за ограничений на существование и единственность задачи оптимального управления (1)-(3). Во-вторых, зачастую довольно сложно делать предположения о поведении популяции.

В работе [9] для модели оптимального управления в среднем поле было предложено рассматривать функционал системы  $F$  как композицию квадратичных функций  $F_1, F_2, \dots, F_K$  с некоторыми весовыми параметрами  $a_i \in R$ ,  $i = 1, \dots, K$

$$F(t, r, y_1, \dots, y_n) = a_1 \cdot F_1(t, r, y_1, \dots, y_n) + a_2 \cdot F_2(t, y_1, \dots, y_n) + \dots + a_K \cdot F_K(t, y_1, \dots, y_n). \quad (4)$$

Здесь  $F_i$  описывает один процесс, происходящий в популяции, например, изоляцию, вакцинацию, госпитализацию и т.д. В этом случае обратная задача восстановления функционала состоит в восстановлении параметров  $a_i$  для (4) по реальным данным. Таким образом, если процесс не был определяющим для популяции, соответствующий весовой коэффициент был бы близок к нулю. В общей постановке решение такой задачи может быть найдено методом минимизации нулевого порядка, не требующим вычисления производных по параметру. Использование таких методов предполагает наличие начального приближения параметров (и, возможно, ограничения на область поиска). В

работе [10] для задач оптимального управления показано, что при представлении функционала в виде (4) параметры  $a_1, \dots, a_k$  взаимосвязаны. Эта взаимосвязь имеет решающее значение при задании начальных приближений для коэффициентов  $a_1, \dots, a_k$  для решения обратной задачи. Очевидно, что связь между параметрами определяется как моделью (2), (3), так и описываемыми реальными данными. При этом алгоритм нахождения оценки такой связи неочевиден, а формулировки вида (1)-(4) требуют дополнительного изучения.

Отметим, что решение рассматриваемой обратной задачи восстановления параметров  $a_1, \dots, a_k$  существует. Это следует из квадратичности исходного функционала стоимости. Однако, решение обратной задачи такого типа может быть не единственным. Единственность решения здесь определяется видом функционала (4) для прямой задачи. Если процессы, описываемые функционалом, независимы, то решение обратной задачи будет единственным. Однако при моделировании реальных ситуаций это условие, как правило, не выполняется. В этом случае оптимальное управление выбирается как локальный минимум, наиболее близкий к имеющемуся начальному приближению.

Отметим также, что проблема, связанная с восстановлением параметров  $a_1, \dots, a_k$ , является не методической, а численной. Для решения обратной задачи (1)-(4) наиболее подходящими являются методы минимизации нулевого порядка, поскольку вычисление производных по параметрам, входящим в системы дифференциальных уравнений, весьма трудоемко и не всегда осуществимо (в зависимости от выбранной системы). Методы нулевого порядка позволяют находить решение итеративно, приближаясь к локальному минимуму по некоторым начальным приближениям коэффициентов. Однако, методы нулевого порядка крайне требовательны к этим начальным приближениям. В статье [11] предложены оценку начальных приближений коэффициентов для запуска численного метода, ориентированного на реальные данные, использование которых позволило бы достичь того локального минимума системы, который описывал бы набор данных.

Обобщая вышесказанное, преимущество использования моделей оптимального управления для описания развития эпидемии заключается в том, что, помимо эпидемиологической составляющей, можно учесть и некоторые социальные эффекты, определяемые поведением населения и его отношением к мерам изоляции. Это поведение математически определяется видом функционала стоимости модели, минимизация которого приводит к корректировке эпидемиологической составляющей. Однако это преимущество является и недостатком использования моделей оптимального управления для описания реальных эпидемиологических ситуаций, поскольку, если речь идёт о прогнозировании, исследователь, как правило, не знает фактического поведения населения. Либо это поведение известно, но его сложно перенести на строгую математическую формулировку с сохранением всех свойств существования и единственности решения задачи. В докладе будут представлены результаты анализа взаимозависимости параметров  $a_1, a_2, \dots, a_k$  в постановке задачи (1)-(4), а также решения обратных задач указанного типа, сформулированных на основе систем обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, на реальных данных по заболеваемости COVID-19 в г. Новосибирске.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tang Zh. A Two-layer Receding-horizon Optimal Control Strategy for Battery Energy Storage System Participating in Peak Load Shifting Considering Degradation Cost / Zh. Tang // 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC) Conference Proceeding. — 2021. P. 1189-1194.
2. Ibrahim O.M. Optimal control model for criminal gang population in a limited-resource setting / O.M. Ibrahim, D. Okuonghae, M.N. Ikhile // International Journal of Dynamic Control. — 2023. — Vol. 11. P. 835–850.
3. Petrakova V.S. Planner model for estimating the dynamic of epidemic spread under limited resources / V.S. Petrakova // Eurasian journal of mathematical and computer applications. — 2025. — Vol. 13. — №11. P. 89–99.

4. Li L. Optimal control of vaccination for an epidemic model with standard incidence rate / L. Li // *Journal of Theoretical Biology*. — 2025. — Vol. 598. — Art. 111993.
5. Jain K. Mathematical analysis of COVID-19 and TB co-infection dynamics with optimal control / K. Jain, B. Anuradha, K. Srikumar // *Modeling Earth Systems and Environment*. — 2025. — Vol. 11. — №1. P.1–22.
6. Paparelli E. Optimal control of an epidemiological Covid-19 model with state constraint / E. Paparelli, R. Giambó, H. Maurer // *Discrete and Continuous Dynamical Systems-B*. — 2025. — Vol. 30. — №2. P.422–448.
7. Petrakova V. Comparison of Two Mean Field Approaches to Modeling an Epidemic Spread / V. Petrakova, O. Krivorotko // *Journal of Optimization Theory and Applications*. — 2025. — Vol. 204. — №3. Art. 39.
8. Zvonareva T. Modeling information dissemination within the framework of the mean field principle / T. Zvonareva, O. Krivorot'ko // *Siberian Electronic Mathematical Reports*. — 2025. — Vol. 21. — №2. P. 1594-1612.
9. Petrakova V. Inverse Coefficient Problem for Epidemiological Mean-Field Formulation / V. Petrakova // *Mathematics*. — 2024. — Vol. 12. — №22. Art. 3581.
10. Kermack W.O. A contribution to the mathematical theory of epidemics / W.O. Kermack, A.G. McKendrick // *Proceedings of the Royal Society*. — 1927. — Vol. 115. P. 700-721.
11. Petrakova V. Study of the formulation of the inverse epidemiological optimal control problem / V. Petrakova, O. Krivorot'ko // *Differential Equations and Dynamical Systems* [in publish]

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВЕТРОВЫХ ПОЛЕЙ ПО ДАНЫМ ТЕЛЕМЕТРИИ В СИСТЕМЕ УЧЁТА ПОЛЁТОВ БПЛА

А.А.Пушкарев<sup>1</sup>, А.В.Дергунов<sup>1</sup>, О.Э.Якубайлик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук», *flash550@yandex.ru*

**Введение.** Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в последние годы стало неотъемлемой частью аэрофотосъёмки, применяемой в сельском хозяйстве, экологии, строительстве и инженерных изысканиях. Дроны позволяют быстро получать изображения высокого пространственного разрешения с географической привязкой, а также сопутствующие полётные данные, включающие параметры навигации и работы бортовых систем [1-4].

Рост объёмов съёмки и расширение набора собираемой информации создают потребность в специализированных платформах, обеспечивающих комплексное хранение, анализ и визуализацию данных. Ключевыми задачами таких систем являются интеграция фотоматериалов, цифровых моделей рельефа, вегетационных индексов и навигационно-телеметрической информации в едином интерфейсе, что упрощает доступ специалистов к результатам и снижает риски фрагментации данных.

Важной особенностью разработанной системы является использование телеметрии для анализа локальных атмосферных условий. Современные БПЛА снабжены датчиками, которые позволяют оценивать скорость и направление ветра во время полёта. Эти данные извлекаются из логов и визуализируются на карте в виде векторных стрелок, отражающих распределение ветра в районе выполнения миссии. Таким образом, помимо традиционной аэрофотосъёмки, система предоставляет пользователю дополнительный инструмент для исследования пространственно-неоднородных процессов в воздушной среде.

В статье представлены архитектура и функциональные возможности веб-системы, описаны методы обработки полётных логов, а также организация работы с продуктами аэрофотосъёмки.

**Архитектура системы.** Разработанная система построена по клиент-серверной архитектуре с использованием монорепоzitория (TurboRepo), что обеспечивает единый процесс разработки и согласованность компонентов. Взаимодействие между ними осуществляется через REST API, структура которого формализована при помощи Zod-контрактов. Такой подход обеспечивает строгую типизацию и снижает вероятность ошибок при интеграции.

Серверная часть реализована на TypeScript (NestJS + Prisma ORM), в качестве системы управления базами данных используется PostgreSQL. Аутентификация пользователей организована с применением JWT-токенов. Архитектура модульная: реализованы сущности для управления пользователями, проектами, полётами, файлами и оборудованием. При загрузке логов выполняется их автоматическая обработка: извлекаются ключевые параметры миссии, включая длительность, пройденное расстояние, высоту, скорость, энергопотребление и данные о ветре. Все результаты сохраняются в базе данных и становятся доступными для дальнейшего анализа.

Продукты аэрофотосъёмки (ортофотопланы, цифровые модели рельефа, вегетационные индексы и др.) хранятся в формате Cloud Optimized GeoTIFF (COG) [5]. Использование этого стандарта позволяет загружать только необходимые части изображений, что обеспечивает высокую производительность при работе даже с десятками гигабайт исходных данных.

Клиентская часть написана на TypeScript с использованием React. Для отображения картографической информации используется библиотека OpenLayers, управление состоянием осуществляется через Zustand, маршрутизация построена на базе @tanstack/react-router. Компоненты интерфейса оформлены с применением библиотеки shadcn/ui. На рисунке 1 представлена схема взаимодействия основных компонентов системы.

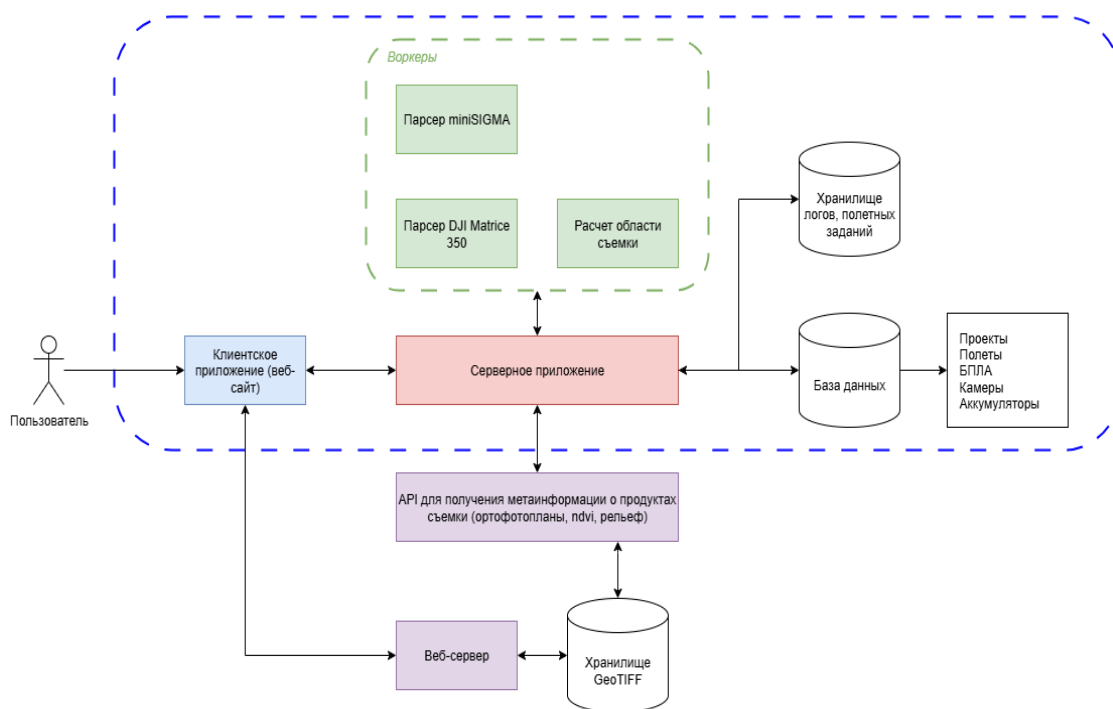


Рис. 1. Схема взаимодействия основных компонентов системы.

**Функциональные возможности системы.** Загрузка лог-файлов в систему сопровождается их автоматическим разбором. В процессе извлекаются основные параметры миссии: длительность полёта, пройденное расстояние, высота, скорость, расход аккумулятора и площадь охвата. Высота над поверхностью вычисляется с использованием цифровой модели рельефа SRTM [6]. Все значения сохраняются в базе данных и визуализируются в интерфейсе как в виде графиков, так и на карте, что позволяет выполнять оперативный анализ миссий без привлечения стороннего ПО.

Система поддерживает отображение продуктов аэрофотосъёмки: ортофотопланов, цифровых моделей рельефа (ЦМР) и вегетационных индексов [7], включая NDVI. Использование формата COG обеспечивает интерактивное панорамирование и масштабирование даже при очень больших размерах файлов (сотни гигабайт). Слои можно включать и выключать, что облегчает сопоставление различных типов данных и проведение пространственного анализа.

Дополнительно из логов извлекаются данные о скорости и направлении ветра, регистрируемые датчиками БПЛА во время полёта. Эти значения отображаются на карте в виде стрелок, указывающих направление и величину

ветра в точках маршрута. Такая визуализация позволяет пользователю оценить условия выполнения миссии, выявить локальные особенности воздушной среды и учитывать их при планировании повторных вылетов.

Система также содержит инструменты учёта оборудования. Для аккумуляторов автоматически фиксируется время работы, уровень заряда до и после полёта, энергопотребление. Данные агрегируются в таблицы и обновляются при каждой загрузке логов, что исключает ручной ввод и снижает вероятность ошибок.

Интерфейс организован вокруг структуры проектов. В каждом проекте доступны все связанные полёты с маршрутами, точками фотографирования, графиками телеметрии и параметрами миссий. Поддерживается поиск и фильтрация, что упрощает работу с большим массивом данных.

Практическое применение. Разработанная система используется для обработки и анализа результатов аэрофотосъёмки с БПЛА. Операторы загружают лог-файлы и продукты съёмки, получают количественные оценки площади охвата, параметров миссии и качества данных без необходимости применения стороннего программного обеспечения. Централизация информации о телеметрии, продуктах съёмки и оборудовании повышает прозрачность процессов, снижает вероятность ошибок и облегчает коллективную работу.

Наличие визуализации ветра расширяет спектр практических задач. Отображение данных о скорости и направлении воздушных потоков в зоне полёта позволяет лучше понимать условия выполнения миссий и учитывать их при повторных вылетах. Такие сведения могут быть полезны в сельском хозяйстве для анализа микроклиматических факторов, в экологических исследованиях для оценки локальных процессов в атмосфере, а также при обеспечении безопасности полётов и планировании маршрутов.

Таким образом, система выступает не только инструментом учёта и визуализации данных аэрофотосъёмки, но и платформой для анализа пространственно-неоднородных процессов. На рисунке 2 представлен интерфейс клиентского веб-приложения.

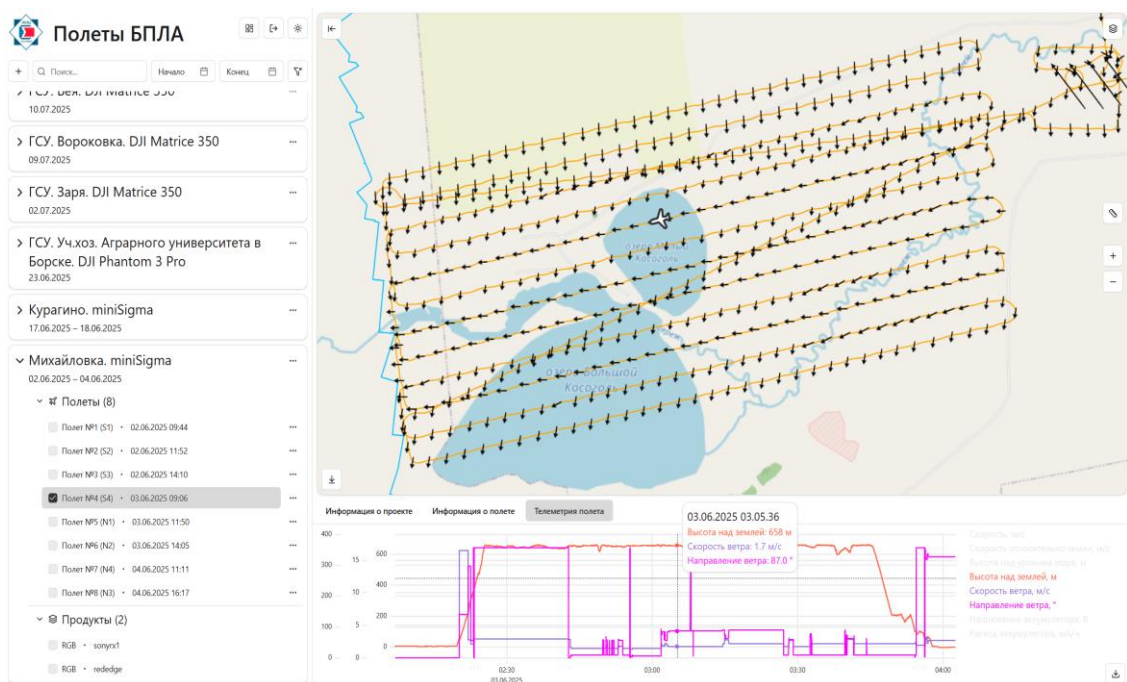


Рис. 2. Интерфейс клиентского веб-приложения.

**Заключение.** Представленная веб-система является комплексным инструментом для хранения, визуализации и анализа данных аэрофотосъёмки, выполняемой с использованием БПЛА. Разработанная архитектура обеспечивает автоматизированную обработку логов полётов, извлечение телеметрических данных и представление результатов съёмки в удобной интерактивной форме. Благодаря поддержке формата COG пользователи получают возможность работать с крупными геопространственными данными непосредственно в браузере, без необходимости загрузки или предварительной конверсии файлов.

Интеграция модуля анализа параметров ветра, получаемых с бортовых датчиков БПЛА, значительно расширяет функциональные возможности системы. Отображение полей скорости и направления ветра в зоне полёта создаёт предпосылки для пространственно-временного анализа атмосферных процессов. Это открывает новые возможности для оценки условий проведения миссий, оптимизации маршрутов полёта, а также исследования микроклиматических особенностей территорий.

Таким образом, разработанная система представляет собой универсальную платформу для поддержки всего цикла работы с данными БПЛА — от сбора и обработки до анализа и интерпретации. Её применение актуально в

широком спектре отраслей: сельском хозяйстве (мониторинг посевов и состояния почв), экологии (оценка состояния природных экосистем), инженерных изысканиях (контроль состояния инфраструктуры), а также в научных и прикладных исследованиях, связанных с атмосферными и геопространственными процессами. Благодаря модульности и масштабируемости архитектуры система может служить основой для дальнейшего развития сервисов дистанционного зондирования и интеллектуального анализа данных БПЛА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shahbazi M., Théau J., Ménard P. Development and Evaluation of a UAV- Photogrammetry System for Precise 3D Environmental Modeling // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7(3). – P. 3291–3310.
2. Nex F., Remondino F. Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 92. – P. 79–97.
3. Subeesh A., Kumar S.P., Chakraborty S.K., Upendar K., Chandel N.S., Jat D., Dubey K., Modi R.U., Khan M.M. UAV imagery coupled deep learning approach for the development of an adaptive in-house web-based application for yield estimation in citrus orchard // Measurement. – 2024. – Vol. 234.
4. Caldas M., Sanches I., Gonçalves J.A. VisWebDrone: A Web Application for UAV Photogrammetry Based on Open- Source Technologies // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13(11). – Article 2243.
5. Cloud Optimized GeoTIFF (COG) published as official OGC Standard. <https://www.ogc.org/announcement/cloud-optimized-geotiff-cog-published-as-official-ogc-standard/> (дата обращения 25.09.2025).
6. Дубинин М. Описание и получение данных SRTM. <http://gis-lab.info/qa/srtm.html> (дата обращения 20.06.2025).
7. Y. Qin, D. Huang, Y. Wang, L. Wang. A Study of the Method for Retrieving the Vegetation Index from FY-3D MERSI-II Data // Remote Sensing, 15(2), pp. 491, 2023.

# ПРИБЛИЖЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОМЕНТОВ НЕЛИНЕЙНОГО НЕЛОКАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ФИШЕРА-КОЛМОГорова-ПЕТРОВСКОГО-ПИСКУНОВА ДРОБНОГО ПОРЯДКА

С.А.Синюков<sup>1</sup>, А.В. Шаповалов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
*ssaykmh@yandex.ru, shpv@mail.tsu.ru*

Эволюционные уравнения с дробной производной по времени используются для описания процессов с эффектами памяти (эридитарности) в различных физических, биологических, химических и других системах (см., например, [1–3]).

Дробное дифференцирование, которое представляет собой интегро-дифференциальный оператор, существенно усложняет уравнение по сравнению с обычным дифференциальным уравнением с производными целого порядка. Свойства дробной производной таковы, что прямое применение известных аналитических методов и приемов интегрирования обычных дифференциальных уравнений, как правило, не приводит к желаемому результату [1–3]. Однако в отдельных случаях аналитические методы для обычных дифференциальных уравнений допускают модификацию и могут использоваться для некоторых дробно-дифференциальных уравнений (например, [3]).

В данной работе рассматривается обобщенное популяционное уравнение Фишера–Колмогорова–Петровского–Пискунова (ФКПП) с нелокальными конкурентными потерями и с дробной производной по времени  $t$  ( $t \geq 0$ ) типа Капуто ( ${}^C D_{0+,t}^\alpha$ ,  $0 < \alpha \leq 1$ ) в случае одной пространственной переменной  $x$ ,  $-\infty < x < +\infty$ , которое в безразмерном виде записывается следующим образом:

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

Производная Капуто  ${}^C D_{0+,t}^\alpha$  (левосторонняя производная) по переменной  $t$  порядка  $\alpha$ ,  $0 < \alpha \leq 1$ , от некоторой вещественной функции  $f(t)$  задается выражением (например, [2,3])

$${}^C D_{0+,t}^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\xi)^{-\alpha} f'(\xi) d\xi, \quad f'(\xi) = df(\xi)/d\xi, \quad t \geq 0. \quad (2)$$

Здесь полагаем, что вещественная функция  $u(x, t)$  представляет популяционную плотность и гладко зависит от своих аргументов таким образом, что выполняемые операции имеют смысл. Подробное описание свойств таких функций можно найти в [1,2]. Функция  $u(x, t)$  по переменной  $x$  принадлежит пространству Шварца вместе со своими производными, что обеспечит существование интеграла в уравнении (1) и существование всех необходимых в дальнейшем моментов. Зависимость от времени  $t$  в функции  $u(x, t)$  предполагается такой, что существует частная по  $t$  производная Капуто (2). 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  $\kappa (> 0)$ ;  $\varepsilon$  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 работах [4,5] был разработан метод квазиклассически сосредоточенных состояний, основанный на теории ростка Маслова [6], для нелокального уравнения (1) с производной первого порядка по времени, т.е. в уравнении (1) дробная производная  ${}^C D_{0+,t}^\alpha u(x, t)$  заменяется на  $u_t(x, t)$ . В соответствии с [4,5], построенное асимптотическое решение сосредоточено в окрестности некоторой

траектории, определяемой динамической системой, ассоциированной с исходным уравнением (1). Решения этой динамической системы содержат существенную информацию о решении исходного уравнения (1) и представляют самостоятельный интерес.

В работах [4,5] асимптотические относительно малого параметра  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$ , решения уравнения ФКПП с производной первого порядка по времени строились в классе траекторно-сосредоточенных функций (ТСФ). Для уравнения (1) с производной по времени вида (2), в соответствии с [4,5], класс ТСФ,  $P_t^\varepsilon$ , определяется его общим элементом  $\Phi(x, t, \varepsilon)$  как

$$P_t^\varepsilon = \left\{ \Phi : \Phi(x, t, \varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \varphi \left( \frac{\Delta x}{\sqrt{\varepsilon}}, t, \varepsilon \right) \right\}, \quad (3)$$

где  $\Delta x = x - X(t, \varepsilon)$ , вещественная функция  $X(t, \varepsilon)$  является произвольным функциональным параметром класса, функция  $\varphi(\eta, t, \varepsilon)$  вместе со своими производными принадлежит пространству Шварца по вещественной переменной  $\eta$ , функции  $X(t, \varepsilon)$  и  $\varphi(\eta, t, \varepsilon)$  регулярно зависят от  $\sqrt{\varepsilon}$  в окрестности нуля, гладко зависят от  $t$  и имеют производную по  $t$  вида (2).

С помощью оценок

$$\hat{p} = \varepsilon \partial_x = \hat{O}(\sqrt{\varepsilon}), \Delta x = \hat{O}(\sqrt{\varepsilon}), \hat{p}^k \Delta x^l = \hat{O}(\varepsilon^{(k+l)/2}), {}^C D_{0+,t}^\alpha = \hat{O}(1). \quad (4)$$

далее получим приближенную с заданной точностью динамическую систему моментов решения уравнения (1) в классе функций вида (3). Здесь  $\hat{A} = \hat{O}(\varepsilon^\mu)$ ,

если  $\|\hat{A}u\| / \|u\| = O(\varepsilon^\mu)$  для любой функции  $u(x, t)$  из  $P_t^\varepsilon$ , а

$$\|u\| = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} u^2(x, t, \varepsilon) dx \right)^{1/2}.$$

Для некоторой функции  $u(x, t, \varepsilon)$  популяционной плотности из класса  $P_t^\varepsilon$  момент нулевого порядка,  $\mu_u(t, \varepsilon)$ , определим интегралом

$$\mu_u(t, \varepsilon) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t, \varepsilon) dx. \quad (5)$$

Величина  $\mu_u(t, \varepsilon)$  имеет смысл популяционной массы. Определим нормированные на  $\mu_u(t, \varepsilon)$  моменты первого порядка,  $x_u(t, \varepsilon)$ , и высших порядков,  $\alpha_u^{(l)}(t, \varepsilon)$ ,  $l > 1$ , выражениями

$$x_u(t, \varepsilon) = \frac{1}{\mu_u(t, \varepsilon)} \int_{-\infty}^{\infty} x u(x, t, \varepsilon) dx, \quad (6)$$

$$\alpha_u^{(l)}(t, \varepsilon) = \frac{1}{\mu_u(t, \varepsilon)} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta x^l u(x, t, \varepsilon) dx. \quad (7)$$

Подчиним функциональный параметр  $X(t, \varepsilon)$ , входящий в функции класса  $P_t^\varepsilon$ , условию

$$X(t, \varepsilon) = x_u(t, \varepsilon). \quad (8)$$

Если функция  $u(x, t, \varepsilon)$  является решением уравнения (1), то условие (8) показывает, что  $u(x, t, \varepsilon)$  локализовано в окрестности кривой  $x = x_u(t, \varepsilon)$ , эволюция которой определяется самим решением  $u(x, t, \varepsilon)$ .

Для функции  $u(x, t, \varepsilon)$  из класса  $P_t^\varepsilon$  моменты (5)–(7) с учетом (8) имеют оценки

$$\mu_u(t, \varepsilon) = O(1), \quad \alpha_u^{(l)}(t, \varepsilon) = O(\varepsilon^{l/2}), \quad \tilde{\alpha}_u^{(l)}(t, \varepsilon) = O(\varepsilon^{l/2}), \quad \varepsilon \rightarrow 0. \quad (9)$$

С помощью оценок (4) и (9) можно получить приближенную с заданной точностью по  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$ , динамическую систему (систему Эйнштейна-Эренфеста) для моментов (5–7) решения  $u(x, t, \varepsilon)$  уравнения (1).

Проиллюстрируем особенности поведения решений на примере уравнения (1) с пространственно однородным темпом роста  $a(x, t) = a(t) > 0$  и конкурентными потерями с высокой степенью нелокальности ( $b(x, y, t) = b(t) > 0$ ). В этом случае система Эйнштейна-Эренфеста до момента второго порядка принимает вид

$${}^C D_{0+,t}^\alpha \mu(t) = a(t) \mu(t) - \kappa b(t) \mu^2(t), \quad (10)$$

$${}^C D_{0+,t}^\alpha \mu(t) \alpha^{(2)}(t) = 2\varepsilon \mu(t) + \alpha^{(2)}(t) {}^C D_{0+,t}^\alpha \mu(t), \quad (11)$$

а уравнение на момент первого порядка (6) допускает постоянное решение  $x(t) = x_0, x_0 = \text{const.}$

Таким образом Задачу Коши для уравнений (10) и (11) с начальными условиями

$$\mu(t=0) = \mu(0), \alpha^{(2)}(t=0) = \alpha^{(2)}(0), \tilde{\alpha}^{(2)}(t=0) = \tilde{\alpha}^{(2)}(0), \quad (12)$$

можно представить в виде интегральных уравнений Вольтерра [2,3]:

$$\mu(t) = \mu(0) + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{d\tau}{(t-\tau)^{1-\alpha}} \mu(\tau) (a(\tau) - \kappa b(\tau) \mu(\tau)), \quad (13)$$

$$\tilde{\alpha}^{(2)}(t) = \tilde{\alpha}^{(2)}(0) + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{d\tau}{(t-\tau)^{1-\alpha}} [2\varepsilon\mu(\tau) + \tilde{\alpha}^{(2)}(\tau) (a(\tau) - \kappa b(\tau) \mu(\tau))], \quad (14)$$

где  $\tilde{\alpha}^{(2)}(t) = \mu(t)\alpha^{(2)}(t)$ . Построим приближенные решения уравнений (13), (14) в виде итераций

$$\mu_{n+1}(t) = \mu_0 + I_{0+t}^\alpha [\mu_n(t)a(t) - \kappa\mu_n^2(t)b(t)], \quad n \geq 1, \quad (15).$$

$$\tilde{\alpha}_{n+1}^{(2)}(t) = \tilde{\alpha}_0^{(2)} + I_{0+t}^\alpha [2\varepsilon\mu_m(t) + \tilde{\alpha}_n^{(2)}(t) (a(t) - \kappa b(t)\mu_m(t))], \quad n > 1, m \geq n. \quad (16)$$

Рассмотрим влияние параметра  $\alpha$  дробной производной Капуто (2) на поведение решений системы (25)–(27) на модельном примере линейной зависимости коэффициентов  $a(t) = a_0 t, b(t) = b_0 t$ . Для исследования поведения итерационных выражений (15), (16) были построены численные решения уравнений (10) и (11) методом Эйлера [3].

Сравнение приближенного и численного решений системы Эйнштейна-Эренфеста (10), (11) показывает, что дробная производная порядка  $\alpha < 1$  изменяет процесс эволюции момента нулевого порядка  $\mu(t)$  (популяционной массы) по сравнению с динамикой, определяемой производной первого порядка  $\alpha = 1$ . Наблюдается тенденция ускорения выхода на стационарное решение, что может объясняться различным темпом диффузии, задаваемым параметром  $\alpha$ . Различие приближенного и численного решений увеличивается для меньших значений порядка дробной производной  $\alpha$ , т.е. для повышения точности требуется больше итераций, получаемых из уравнений Вольтерра.

Итерационный метод в рассмотренном иллюстративном примере дает представление о поведении решений системы Эйнштейна-Эренфеста на относительно малых временах и недостаточен для больших времен.

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. Самко С.Г. Интегралы и производные дробного порядка, и некоторые их приложения / С.Г. Самко, А.А. Килбас, О.И. Маричев – Минск: Наука и техника, 1987. – 688 с.
2. Kilbas A.A. Theory and application of fractional differential equations / A.A. Kilbas, H.M. Srivastava, J.J. Trujillo – Amsterdam: North-Holland Math. Stud. V.204. Elsevier, 2006. – 540 p.
3. Milici C. Introduction to fractional differential equations / C. Milici, G. Draganescu, J.T. Machado – Cham: Springer, 2019. – 188 p.
4. Трифонов А.Ю. Одномерное уравнение Фишера-Колмогорова с нелокальной нелинейностью в квазиклассическом приближении / А.Ю. Трифонов, А.В. Шаповалов // Известия вузов, Физика. – 2009. – Т.52 – №.9. С.14–23.
5. Shapovalov A.V. An application of the Maslov complex germ method to the one-dimensional nonlocal Fisher–KPP equation / A.V. Shapovalov, A.Yu. Trifonov // Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys. – 2018. – V. 15 – № 6. 30 pp.
6. Маслов В.П. Комплексный метод ВКБ в нелинейных уравнениях. – М.: Наука, 1977. – 384 с.

# КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ДЛИНА И ДИНАМИЧЕСКИЙ ИНДЕКС $Z$ КВАЗИОДНОМЕРНОГО ИЗИНГОВСКОГО НАНОМАГНЕТИКА

Д.В. Спирин<sup>1</sup>, В.Н. Удодов<sup>2</sup>

ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф.

Катанова»,

Инженерно-технологический институт, <sup>1</sup>каф. цифровых технологий и дизайна, [dvspirin@mail.ru](mailto:dvspirin@mail.ru), <sup>2</sup>каф. промышленного, гражданского строительства и техносферной безопасности, [udodov@khsu.ru](mailto:udodov@khsu.ru)

Исследование низкоразмерного магнетизма – важная задача физики твердого тела. Экспериментальный интерес к этой проблеме связан с необычными магнитными свойствами органических соединений, ферромагнитных пленок и поверхностей [1-3]. Особый класс низкоразмерных магнитных систем с локальными моментами – квазиодномерные соединения, содержащие цепочки магнитных атомов со слабым межцепочечным обменом, в некоторых случаях такие системы описываются моделью Изинга [3]. Экспериментальные и теоретические исследования квазиодномерных магнетиков представляют большие трудности, что делает необходимым на первом этапе компьютерное моделирование процессов в таких системах [4]. В докладе предложен метод расчета корреляционной длины и динамического индекса  $Z$  для квазиодномерного изинговского наномангнетика.

В модифицированной модели одномерного изинговского наномангнетика с граничными условиями «оборванные концы» учитываются ближнее взаимодействие ( $j_1$ ), взаимодействие вторых ( $j_2$ ) и третьих соседей ( $j_3$ ), а также четырехчастичное взаимодействие ( $j_4$ ). Гамильтониан магнетика имеет вид [5]

$$\varepsilon = -h \sum_{i=1}^N s_i - j_1 \sum_{i=1}^{N-1} s_i s_{i+1} - j_2 \sum_{i=1}^{N-2} s_i s_{i+2} - j_3 \sum_{i=1}^{N-3} s_i s_{i+3} - j_4 \sum_{i=1}^{N-3} s_i s_{i+1} s_{i+2} s_{i+3}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество узлов в одномерном магнетике;  $i$  – номер узла;  $s_i$  – проекция безразмерного вектора спинового магнитного момента  $i$ -го узла на ось  $z$ , вдоль которой направлена напряженность внешнего магнитного поля;  $h$  – энергия

взаимодействия узла с внешним магнитным полем. Граничные условия «оборванные (свободные) концы» моделируют реальную одномерную цепочку, например, на поверхности кристалла [3]. Удобно выразить гамильтониан через магнитную энергию взаимодействия ближайших соседей [4]  $E = \varepsilon/|j_1|$

$$E = -H \sum_{i=1}^N s_i \pm \sum_{i=1}^{N-1} s_i s_{i+1} - J_2 \sum_{i=1}^{N-2} s_i s_{i+2} - J_3 \sum_{i=1}^{N-3} s_i s_{i+3} - J_4 \sum_{i=1}^{N-4} s_i s_{i+4} \quad (2)$$

Если энергия взаимодействия ближайших соседей положительна, то перед вторым слагаемым в гамильтониане ставится знак «-», если отрицательна, то знак «+».

В настоящей работе конечное состояние системы соответствует антиферромагнитной фазе ( $j_1 < 0$ ), а начальная ферромагнитная фаза достигается включением большого внешнего магнитного поля ( $|H| > 2$ ). Для моделирования кинетики фазового перехода ферромагнетик-антиферромагнетик использовался алгоритм Метрополиса, который учитывает влияние температуры  $T$  на процесс [6, 7]. Подобные превращения наблюдаются экспериментально [4].

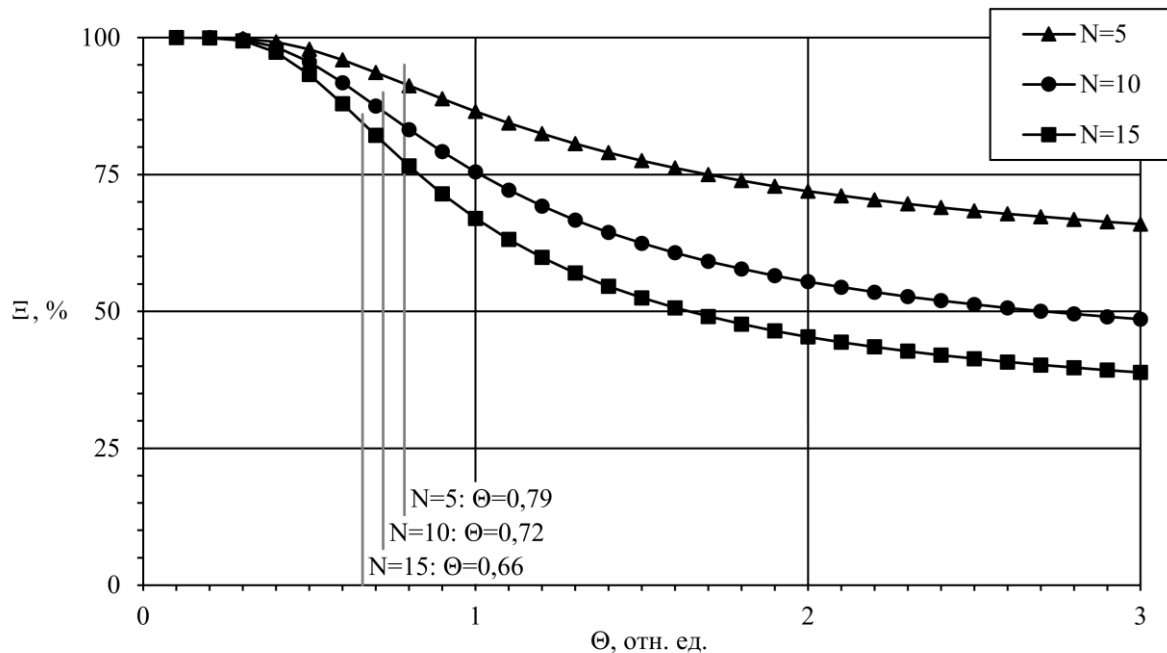


Рис. 1. Зависимость относительной корреляционной длины  $\Xi$  от температуры  $\Theta$ .  
 $j_1 < 0, H = J_2 = J_3 = J_4 = 0$ .

Мерой времени перехода ферромагнетик-антиферромагнетик (времени релаксации  $\tau$ ) является количество шагов Монте-Карло, за которое система достигнет антиферромагнитной фазы. Удобно использовать безразмерную

приведенную температуру:  $\Theta = kT/|j_1|$  ( $k$  – постоянная Больцмана). Генератором псевдослучайных чисел являлся «Вихрь Мерсенна» [8].

В классической одномерной модели Изинга критическая температура равна нулю ( $\Theta_c = 0$ ) [7], следовательно, равна нулю и ширина критической области температур. Но для систем с конечными размерами, используемых при компьютерном моделировании, критическая область размыта ( $\Theta_c > 0$ ). Так как расчёт критических индексов, в частности динамического критического индекса  $Z$ , должен осуществляться на границе критической области, то возникает необходимость вычисления критических температур для спектра значений параметров квазиодномерного изинговского наномангнетика. Реализовать эту задачу позволяет температурная зависимость корреляционной длины, рассчитанной для состояния равновесия.

Корреляционная длина  $\xi$  – это средняя по ансамблю длина самого длинного магнитного кластера частиц (участка магнетика, в котором имеется антиферромагнитный порядок) [6, 7]. На рисунке 1 представлена температурная зависимость средней относительной корреляционной длины ( $\Xi = (\xi / N) \cdot 100\%$ ). Количество измерений для каждой точки графика составило 100 млрд. При низких температурах значение корреляционной длины близки к 100%, что соответствует антиферромагнитному порядку во всей цепочки узлов. Таким температурам соответствует критическая область фазового перехода. При высоких же температурах ( $\Theta > 2$ ) – значения  $\Xi$  менее 75%. Поскольку расчёты проводились для состояния равновесия, то, следовательно, при высоких температурах, даже в состоянии равновесия, во всей цепочки узлов отсутствует антиферромагнитный порядок. Из рисунка 1 также видно, что чёткой границы между температурами упорядоченной и неупорядоченной фазы не существует. Следовательно, размытой является и граница критической области. Центром размытой границы (критической температурой  $\Theta_c$ ) можно считать точку отдельного графика, для которой касательная к графику имеет наибольший угол наклона к горизонтальной оси. Или, другими словами, температура, при которой убывание корреляционной длины максимально. На рисунке 1 критическим

температурам для размеров магнетика 5, 10 и 15 узлов соответствуют вертикальные линии.

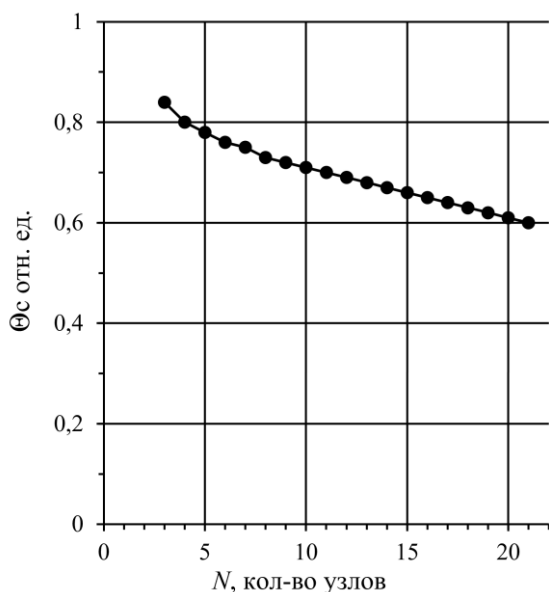


Рис. 2. Зависимость критической температуры  $\Theta_c$  от размеров наномангнетика  $N$ .  
 $i_1 < 0, H = J_2 = J_3 = J_4 = 0$ .

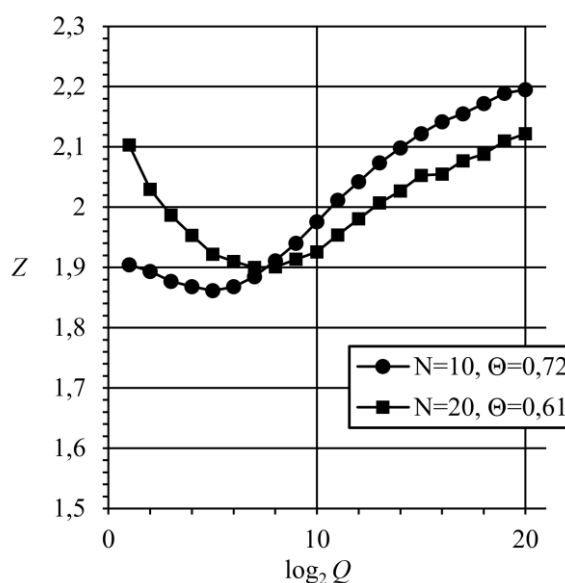


Рис. 3. Зависимость динамического критического индекса  $Z$  количества цепочек  $Q$ .

Используя вышеописанный метод, были получены критические температуры для размеров цепочек квазиодномерного изинговского наномангнетика от 3 до 21 узлов с точностью до 0,01 относительных единиц температуры (рис. 2). Из графика следует, что при увеличении размеров системы критическая температура монотонно уменьшается. При этом, для наименьших размеров системы скорость убывания наибольшая. Это не противоречит выводу для классической модели Изинга, что в термодинамическом пределе ( $N \rightarrow \infty$ ) критическая температура равна нулю. Максимальное значение критической температуры составило 0,84 отн. ед. при наименьшем размере цепочек ( $N = 3$ ).

В наномасштабе модель представляет собой совокупность  $Q$  параллельных друг другу одномерных изинговых цепочек, имеющих одинаковую длину ( $N$ ). Расстояние между цепочками достаточно велико для того, чтобы между ними отсутствовало магнитное взаимодействие. При этом магнитный переход осуществляет вся система, как единое целое. Например, существует намагниченность всей системы.

Была исследована зависимость динамического критического индекса  $Z$  от количества цепочек в модели ( $Q$ ) для двух случаев:  $N = 10$  и  $N = 20$  (рис. 3). Индекс  $Z$  характеризует зависимость времени релаксации перехода ферромагнетик – антиферромагнетик от длины цепочки  $N$  [7]. Чем больше значение индекса, тем быстрее растёт время релаксации с увеличением числа узлов. Зависимость времени релаксации от количества узлов на границе критической области имеет вид [7]

$$\tau \propto N^Z. \quad (3)$$

В классической теории Ландау-Халатникова значение кинетического индекса  $Z = 2$  для трехмерных систем [7], экспериментальные значения для макросистем не более, чем  $Z \approx 2,6$  [9].

Для обоих случаев при малом числе цепочек (для  $N = 10$ :  $Q < 64$ ;  $N = 20$ :  $Q < 256$ ) зависимость критический индекс  $Z$  не монотонная (рис. 3). При большом числе цепочек зависимость монотонно возрастающая. Немонотонность данной зависимости может привести к ошибкам при анализе зависимостей индекса от других параметров. С учетом округления до порядка величины, граница описанных выше частей рисунка составляет  $Q = 1000$ . Следовательно, в дальнейших расчетах целесообразно рассматривать модель, представляющую собой не менее 1000 параллельных друг другу цепочек.

Скорость роста значений индекса быстро уменьшается с ростом числа цепочек. Однако интерполяция по обратному количеству цепочек не выявляет какого-либо асимптотического поведения. Минимальное значение  $Z$  составило  $1,861 \pm 0,004$ , для  $Q = 32$ , максимальное –  $2,12 \pm 0,04$ , для  $Q = 2$  млн.

Таким образом, исследована температурная зависимость корреляционной длины квазиодномерного изинговского наномангнетика. Показано размытие критической области фазового перехода вне термодинамического предела и предложен метод расчёта границы критической области (критической температуры  $\Theta_c$ ). С помощью данного метода рассчитаны критические температуры для размеров магнетика от 3 до 21 узлов. Для двух критических температур исследована зависимость динамического критического индекса  $Z$  от

количества цепочек в модели. Показано, что целесообразно рассматривать модель, представляющую собой не менее 1000 параллельных друг другу цепочек, т.к. при этом условии зависимость критического индекса  $Z$  от количества цепочек в магнетике монотонная. Монотонность данной зависимости необходима для безошибочного анализа зависимостей индекса  $Z$  от других параметров, что планируется сделать в дальнейшем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горнаков, В.С. Доменная структура и микромеханизмы перемагничивания в квазидвумерных обменно-смещенных наномангнетиках / В.С.Горнаков, И.В.Шашков, М.А.Лебедкин, Т.А.Лебедкина // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60. – № 11. С. 2181-2189.
2. Муртазаев, А.К. Модели наномангнетиков с модулированными структурами / А.К.Муртазаев, Ж.Г.Ибаев, Я.К.Абуев // Ин-женерная физика. – 2017. – № 8. – С. 62-70.
3. Александрова, Г.П. Магнитная активность наноструктурированных биополимерных наномангнетиков / Г.П.Александрова, Л.А.Грищенко, А.С.Богомяков, Б.Г.Сухов, В.И.Овчаренко, Б.А.Трофимов // Известия Академии наук. Серия химическая. – 2010. – № 12. – С. 2261-2265.
4. Белим С.В. Исследование фазовых переходов в системах с конкурирующими взаимодействиями в магнитном поле методом компьютерного моделирования / С.В.Белим //Письма о материалах. 10 (1), 2020. – С. 5.
5. Spirin D.V. Percolation effect in quasi-one-dimensional Ising ragged magnet / D.V.Spirin, V.N.Udodov // Letters on Materials 10 (3), 2020. – pp. 334-339.
6. Бекстер Р. Точно решаемые модели в статистической механике. / Р.Бекстер – М.: Мир, 1988. – 487 с.
7. Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.10. Физическая кинетика. – Изд. 2 / Е.М.Лифшиц, Л.П.Питаевский. – М.: Физматлит, 2007. – 536 с.
8. Matsumoto, M. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator / M. Matsumoto, T.Nishimura // ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations 8 (1), 1998. – pp. 3-30.

9. Камилов, И.К. Исследование критической динамики магнитоупорядоченных кристаллов ультразвуковыми методами / И.К.Камилов, Х.К.Алиев // УФН, 1998, 168. – С. 953-974.

## СПИСОК ДОКЛАДОВ

|                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко<br>ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА<br>В КРЕМНИЕВОЙ N-I-P НАНОСТРУКТУРЕ                                                                      | 3  |
| С.А. Большаков, Ю.Н. Трубников, А.В. Дергунов, К.В. Краснощеков,<br>О.Э. Якубайлик<br>АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО ИНДЕКСА ПИ1<br>К ВАРИАЦИЯМ УСЛОВИЙ СЪЁМКИ ДЛЯ ЗАДАЧ ПОЧВЕННОГО<br>КАРТОГРАФИРОВАНИЯ | 12 |
| Е. А. Ващенко, М. Г. Доррер<br>ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ<br>ЧЕРЕЗ ВИДЕОАНАЛИТИКУ                                                                                                        | 19 |
| С.Л. Гафнер, А.А. Череповская, Ю.Я. Гафнер,<br>И.С. Бекешева, И.С. Замулин<br>МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ<br>ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ НАНОЧАСТИЦ<br>БИНАРНОГО СПЛАВА Ag-Cu                  | 26 |
| М.Г. Доррер, М.А. Масюк<br>АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНОСТИ И ЭВОЛЮЦИИ МОДЕЛИ БИЗНЕС-<br>ПРОЦЕССОВ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ                                                                                       | 36 |
| В.В.Иванова, А.М.Корсаков<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА<br>МОБИЛЬНОГО РОБОТА КАК НАБОРА ИНФОРМАЦИОННО-<br>ДВИГАТЕЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ                                                           | 45 |
| Е.Д.Каропова, В.С.Петракова                                                                                                                                                                                 |    |

|                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| АЛГОРИТМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УНИМОДАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ<br>ВЫБОРОК ИЗ МУЛЬТИМОДАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЯДА                                                                                        | 54  |
| Ю. В. Коловский<br>КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЛЕКСНАЯ<br>КВАЛИМЕТРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНЫХ<br>СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ                                                                   | 62  |
| Н.И. Косарев<br>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ РЕКОМБИНАЦИИ<br>КСЕНОНОВОЙ ПЛАЗМЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ<br>ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ФОТОИОНИЗАЦИИ АТОМОВ КСЕНОНА                                      | 76  |
| М.И. Малимонов, О.Э. Якубайлик<br>РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И<br>АНАЛИЗА ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЕМЕРА                                                                | 84  |
| В.С.Петракова<br>ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ<br>ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ                                                                                              | 91  |
| А.А.Пушкарев, А.В.Дергунов, О.Э.Якубайлик<br>МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВЕТРОВЫХ ПОЛЕЙ ПО<br>ДАНЫМ ТЕЛЕМЕТРИИ В СИСТЕМЕ УЧЁТА ПОЛЁТОВ БПЛА                                            | 97  |
| С.А.Синюков, А.В. Шаповалов<br>ПРИБЛИЖЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ<br>МОМЕНТОВ НЕЛИНЕЙНОГО НЕЛОКАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ<br>ФИШЕРА-КОЛМОГОРОВА-ПЕТРОВСКОГО-ПISKУНОВА<br>ДРОБНОГО ПОРЯДКА | 103 |

Д.В. Спирин, В.Н. Удодов

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ДЛИНА И ДИНАМИЧЕСКИЙ ИНДЕКС  $Z$   
КВАЗИОДНО-МЕРНОГО ИЗИНГОВСКОГО НАНОМАГНЕТИКА

109

## АЛФАВИТНЫЙ СПИСОК УЧАСТНИКОВ СЕМИНАРА

| Участник                             | Адрес                                                                                                                                                                                    | Стр. |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Бекешева Ирина<br>Сергеевна          | 655017, г. Абакан, ул. Ленина, д. 92 Хакасский<br>государственный университет им. Н. Ф.<br>Катанова<br>E-mail: irrisskay@mail.ru                                                         | 26   |
| Богатов Николай<br>Маркович          | 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149<br>ФГБОУ ВО «Кубанский государственный<br>университет»<br>E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru                                                    | 3    |
| Большаков<br>Святослав<br>Алексеевич | 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50,<br>Лаборатория. космических систем и технологий<br>ФИЦ КНЦ СО РАН<br>E-mail: bolshakov.sa@ksc.krasn.ru                                     | 12   |
| Ващенко Ева<br>Андреевна             | 660000, Красноярск, просп. Имени газеты<br>Красноярский Рабочий, 31, Сибирский<br>государственный университет науки и<br>технологий им. М.Ф. Решетнева<br>E-mail: vaschenkoeva@yandex.ru | 19   |
| Володин Владимир<br>Сергеевич        | 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149<br>ФГБОУ ВО «Кубанский государственный<br>университет»<br>E-mail: volodinvs1995@mail.ru                                                    | 3    |
| Гафнер Светлана<br>Леонидовна        | 655017, г. Абакан, ул. Ленина, д. 92 Хакасский<br>государственный университет им. Н. Ф.<br>Катанова<br>E-mail: sgafner@rambler.ru                                                        | 26   |

|                                    |                                                                                                                                                                                                                   |        |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Гафнер Юрий<br>Яковлевич           | 655017, г. Абакан, ул. Ленина, д. 92 Хакасский<br>государственный университет им. Н. Ф.<br>Катанова<br>E-mail: ygafner@khsu.ru                                                                                    | 26     |
| Григорьян Леонтий<br>Рустемович    | 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149<br>ФГБОУ ВО «Кубанский государственный<br>университет»<br>E-mail: leonmezon@mail.ru                                                                                 | 3      |
| Дергунов Александр<br>Владимирович | 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50,<br>Лаборатория. космических систем и технологий<br>ФИЦ КНЦ СО РАН<br>E-mail: alexdergunov@icm.krasn.ru                                                              | 12, 97 |
| Доррер Михаил<br>Георгиевич        | 660000, Красноярск, просп. Имени газеты<br>Красноярский Рабочий, 31, Сибирский<br>государственный университет науки и<br>технологий им. М.Ф. Решетнева<br>E-mail: dorrer_mg@sibsau.ru                             | 19, 36 |
| Иванова Виктория<br>Владимировна   | 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д.<br>21, Центральный научно-исследовательский и<br>опытно-конструкторский институт<br>робототехники и технической кибернетики<br>(ЦНИИ РТК)<br>E-mail: v.ivanova@rtc.ru | 45     |
| Замулин Иван<br>Сергеевич          | 655017, г. Абакан, ул. Ленина, д. 92 Хакасский<br>государственный университет им. Н. Ф.<br>Катанова<br>E-mail: zamulin_is@khsu.ru                                                                                 | 26     |

|                                           |                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Карепова Евгения<br>Дмитриевна            | 660036, Красноярск, Академгородок, дом. 50,<br>стр. 44, Институт вычислительного<br>моделирования СО РАН<br>E-mail: <a href="mailto:e.d.karepova@icm.kras.ru">e.d.karepova@icm.kras.ru</a>                                                                | 54 |
| Коваленко Максим<br>Сергеевич             | 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149<br>ФГБОУ ВО «Кубанский государственный<br>университет»<br>E-mail: <a href="mailto:m.s.kovalenko@ya.ru">m.s.kovalenko@ya.ru</a>                                                                              | 3  |
| Коловский Юрий<br>Васильевич              | 660041 Красноярск, пр. Свободный, 82,<br>Сибирский федеральный университет<br>E-mail: <a href="mailto:kolovskiuv@yandex.ru">kolovskiuv@yandex.ru</a>                                                                                                      | 62 |
| Корсаков Антон<br>Михайлович              | 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д.<br>21, Центральный научно-исследовательский и<br>опытно-конструкторский институт<br>робототехники и технической кибернетики<br>(ЦНИИ РТК)<br>E-mail: <a href="mailto:a.korsakov@rtc.ru">a.korsakov@rtc.ru</a> | 45 |
| Косарев Николай<br>Иванович               | 660025, Красноярск, просп. Имени газеты<br>Красноярский Рабочий, 95, Сибирский<br>федеральный университет, Институт цветных<br>металлов<br>E-mail: <a href="mailto:Kosarev_nikolai@mail.ru">Kosarev_nikolai@mail.ru</a>                                   | 76 |
| Краснощеков<br>Константин<br>Вячеславович | 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50,<br>Лаборатория. космических систем и технологий<br>ФИЦ КНЦ СО РАН<br>E-mail: <a href="mailto:krasko@icm.krasn.ru">krasko@icm.krasn.ru</a>                                                                   | 12 |

|                                  |                                                                                                                                                                              |        |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Малимонов Максим Игоревич        | 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, Лаборатория. космических систем и технологий<br>ФИЦ КНЦ СО РАН<br>E-mail: malimonov.mi@ksc.krasn.ru                            | 84     |
| Масюк Максим Анатольевич         | 660000, Красноярск, просп. Имени газеты Красноярский Рабочий, 31, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева<br>E-mail: masuk-max@yandex.ru | 36     |
| Пушкарёв Александр Александрович | 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, Лаборатория. космических систем и технологий<br>ФИЦ КНЦ СО РАН<br>E-mail: pushkarev@icm.krasn.ru                               | 97     |
| Петракова Виктория Сергеевна     | 660036, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44, Институт вычислительного моделирования СО РАН<br>E-mail: rikka@icm.kras.ru                                              | 54, 91 |
| Синюков Сергей Александрович     | 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет<br>E-mail: ssaykmh@yandex.ru                                            | 103    |
| Спирин Дмитрий Владимирович      | 655000, Абакан, пр. Ленина 90, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, Инженерно-технологический институт<br>E-mail: dvspirin@mail.ru                       | 109    |

|                                      |                                                                                                                                                   |               |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Трубников Юрий<br>Николаевич         | 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50,<br>Лаборатория. космических систем и технологий<br>ФИЦ КНЦ СО РАН<br>E-mail: trubnikov124@yandex.ru | 12            |
| Удодов Владимир<br>Николаевич        | 655017, Абакан, пр. Ленина, д. 92/1, каб. 513,<br>Хакасский государственный университет им.<br>Н.Ф. Катанова (ХГУ),<br>E-mail: udodov@khsu.ru     | 109           |
| Череповская Арина<br>Александровна   | 655017, г. Абакан, ул. Ленина, д. 92 Хакасский<br>государственный университет им. Н. Ф.<br>Катанова<br>E-mail: arina.cherepovskaya@mail.ru        | 26            |
| Шаповалов<br>Александр<br>Васильевич | 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный<br>исследовательский Томский государственный<br>университет<br>E-mail: shpv@mail.tsu.ru            | 103           |
| Якубайлик Олег<br>Эдуардович         | 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50,<br>Лаборатория. космических систем и технологий<br>ФИЦ КНЦ СО РАН<br>E-mail: oleg@icm.krasn.ru      | 12, 84,<br>97 |

*Научное издание*

**Моделирование неравновесных адаптивных и управляемых систем—  
2025**

Материалы XXVIII Всероссийского семинара 3 октября 2025 г.

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

Подписано в печать «4» сентября 2025 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