

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№ 3 2026

Научный журнал

Журнал основан в 2007 году

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-60735.

Электронная версия размещается на сайте <https://applied-research.ru>

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Стукова Наталия Юрьевна, к.м.н.

Технический редактор Доронкина Е.Н.

Корректоры: Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Зав. редакцией Шнуровозова Т.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.б.н., проф. **Абдуллаев А.** (Душанбе); к.б.н. **Алиева К.Г.** (Махачкала); д.х.н., к.ф.-м.н., проф. **Алоев В.З.** (Чегем-2); д.б.н., проф. **Андреева А.В.** (Уфа); к.географ.н., доцент **Аничкина Н.В.** (Москва); к.ф.-м.н. **Барановский Н.В.** (Томск); д.б.н., доцент **Белых О.А.** (Иркутск); д.т.н., проф. **Бурмистрова О.Н.** (Ухта); д.т.н., доцент **Быстров В.А.** (Новокузнецк); д.м.н., проф. **Гарбуз И.Ф.** (Тирасполь); д.ф.-м.н., проф. **Геворкян Э.А.** (Москва); д.х.н., проф. **Гурбанов Г.Р.** (Баку); д.ветеринар.н., доцент **Ермолина С.А.** (Киров); к.т.н. **Есенаманова М.С.** (Атырау); к.ф.-м.н., д.п.н., проф. **Ефремова Н.Ф.** (Ростов-на-Дону); д.м.н. **Жураковский И.П.** (Новосибирск); д.т.н., доцент **Ибраев И.К.** (Темиртау); к.т.н., доцент **Исмаилов З.И.** (Баку); д.б.н., с.н.с. **Кавцевич Н.Н.** (Североморск); д.т.н., проф. **Калмыков И.А.** (Ставрополь); д.б.н. **Кокорева И.И.** (Алматы); д.г.-м.н., доцент **Копылов И.С.** (Пермь); к.б.н., доцент **Коротченко И.С.** (Красноярск); к.с.-х.н., доцент **Кряжева В.Л.** (Нижний Новгород); д.ф.-м.н., доцент **Кульков В.Г.** (Волжский); д.б.н. **Ларионов М.В.** (Балашов); д.б.н., к.с.-х.н., доцент **Леонтьев Д.Ф.** (Иркутск); д.географ.н., к.б.н., проф. **Луговской А.М.** (Москва); д.т.н., проф. **Несветаев Г.В.** (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н. **Никитин С.Н.** (п. Тимирязевский); д.фарм.н., доцент **Олешко О.А.** (Пермь); д.с.-х.н., с.н.с., проф. **Партноев К.** (Душанбе); к.п.н., доцент **Попова И.Н.** (Москва); д.т.н., проф. **Рогачев А.Ф.** (Волгоград); д.м.н., с.н.с., доцент **Розыходжаева Г.А.** (Ташкент); д.г.-м.н. **Сакиев К.С.** (Бишкек); д.т.н., проф. **Сугак Е.В.** (Красноярск); д.ветеринар.н., проф. **Трефилов Б.Б.** (Санкт-Петербург); к.т.н., доцент **Хайдаров А.Г.** (Санкт-Петербург); д.м.н., проф. **Чарышкин А.Л.** (Санкт-Петербург); д.географ.н., проф. **Чодураев Т.М.** (Бишкек); д.б.н., проф. **Шалтыков К.Т.** (Бишкек); к.х.н. **Шарифуллина Л.Р.** (Москва); д.п.н., проф. **Щирин Д.В.** (Санкт-Петербург)

ISSN 1996-3955

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,556

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,357

Периодичность

12 номеров в год

Учредитель, издатель и редакция

ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Почтовый адрес

105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя

410056, г. Саратов, ул. им. Чапаева В.И., д. 56

Типография

ООО «НИЦ Академия Естествознания»

410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

E-mail

edition@rae.ru

Телефон

+7 (499) 705-72-30

Подписано в печать

30.06.2026

Дата выхода номера

30.07.2026

Формат

60x90 1/8

Усл. печ. л.

5,9

Тираж

100 экз.

Заказ

МЖПиФИ 2026/3

Распространяется по свободной цене

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH

№ 3 2026

Scientific journal

The journal is based in 2007

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. **Certificate – PI No. FS 77-60735.**

The electronic version takes places on a site <https://applied-research.ru>

CHIEF EDITOR

Stukova Natalia Yurievna, Cand. Sci. (Medical)

Technical editor Doronkina E.N.

Correctors: Galenkina E.S., Dudkina N.A.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Head of the editorial board Shnurovozova T.V.

EDITORIAL BOARD

D.Sc., Prof. **Abdullaev A.** (Dushanbe); Cand.Sc. **Alieva K.G.** (Makhachkala); D.Sc., Cand.Sc., Prof. **Aloev V.Z.** (Chegem-2); D.Sc., Prof. **Andreeva A.V.** (Ufa); Cand.Sc., Docent **Anichkina N.V.** (Moscow); Cand.Sc. **Baranovsky N.V.** (Tomsk); D.Sc., Docent **Belykh O.A.** (Irkutsk); D.Sc., Prof. **Burmistrova O.N.** (Ukhta); D.Sc., Docent **Bystrov V.A.** (Novokuznetsk); D.Sc., Prof. **Garbuz I.F.** (Tiraspol); D.Sc., Prof. **Gevorkyan E.A.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Gurbanov G.R.** (Baku); D.Sc., Docent **Ermolina S.A.** (Kirov); Cand.Sc. **Yesenamanova M.S.** (Atyrau); D.Sc., Cand.Sc., Prof. **Efremova N.F.** (Rostov-on-Don); D.Sc. **Zhurakovsky I.P.** (Novosibirsk); D.Sc., Docent **Ibraev I.K.** (Temirtau); Cand.Sc., Docent **Ismailov Z.I.** (Baku); D.Sc. **Kavtsevich N.N.** (Severomorsk); D.Sc., Prof. **Kalmykov I.A.** (Stavropol); D.Sc. **Kokoreva I.I.** (Almaty); D.Sc., Docent **Kopylov I.S.** (Permian); Cand.Sc., Docent **Korotchenko I.S.** (Krasnoyarsk); Cand.Sc., Docent **Kryazheva V.L.** (Nizhny Novgorod); D.Sc., Docent **Kulkov V.G.** (Volzhsky); D.Sc. **Larionov M.V.** (Balashov); D.Sc., Cand.Sc., Docent **Leontiev D.F.** (Irkutsk); D.Sc., Cand. Sc., Prof. **Lugovskoy A.M.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Nesvetaev G.V.** (Rostov-on-Don); D.Sc. **Nikitin S.N.** (p. Timiryazevsky); D.Sc., Docent **Oleshko O.A.** (Permian); D.Sc., Prof. **Partoev K.** (Dushanbe); Cand.Sc., Docent **Popova I.N.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Rogachev A.F.** (Volgograd); D.Sc. Docent **Rozykhodzhaeva G.A.** (Tashkent); D.Sc. **Sakiev K.S.** (Bishkek); D.Sc., Prof. **Sugak E.V.** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. **Trefilov B.B.** (Saint Petersburg); Cand.Sc., Docent **Khaidarov A.G.** (Saint Petersburg); D.Sc., Prof. **Charyshkin A.L.** (Saint Petersburg); D.Sc., Prof. **Choduraev T.M.** (Bishkek); D.Sc., Prof. **Shalpykov K.T.** (Bishkek); Cand.Sc. **Sharifullina L.R.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Shchirin D.V.** (Saint Petersburg)

ISSN 1996-3955

Impact-factor RISQ (two-year) = 0,556

Impact-factor RISQ (five-year) = 0,357

Periodicity 12 issues per year

Founder, publisher and editors LLC PH Academy of Natural History

Mailing address 105037, Moscow, p.o. box 47

Editorial and publisher address 410056, Saratov, st. them. Chapaeva V.I., 56

Printing house LLC SPC Academy of Natural History
410035, Saratov, st. Mamontova, 5

E-mail edition@rae.ru

Telephone +7 (499) 705-72-30

Signed for print 30.06.2026

Number issue date 30.07.2026

Format 60x90 1/8

Conditionally printed sheets 5,9

Circulation 100 copies

Order МЖПиФИ 2026/3

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

ТРАНСФОРМАЦИЯ ХЛОРОФИЛЛА И ВЛИЯНИЕ ЕГО ДЕРИВАТОВ
НА КОМПОНЕНТЫ ПИЩИ В ПРОЦЕССЕ ПИЩЕВАРЕНИЯ

Колдаев В. М. 5

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

ОРГАНИЗАЦИЯ ПАЛЛИАТИВНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ В РЯЗАНИ

Белых Н. А., Стежкина Е. В. 10

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАПРАВЛЕННОЙ КОСТНОЙ И ТКАНЕВОЙ
РЕГЕНЕРАЦИИ В ХИРУРГИЧЕСКОМ ЛЕЧЕНИИ ПАРОДОНТАЛЬНЫХ
ДЕФЕКТОВ

Коновалова Е. В., Иванов П. В., Щетинин В. В., Шастин Е. Н., Рыбас А. Р. 16

ХРОНИЧЕСКИЙ БОЛЕВОЙ СИНДРОМ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ
К ДИАГНОСТИКЕ И ЛЕЧЕНИЮ

Шибитова Д. В., Пекур И. А., Сайфуллина Ф. Р., Жанакулова Ж. М., Акболат Л. 23

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

РОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАЗМЕРНОСТИ В ДИНАМИКЕ
СТОХАСТИЧЕСКИХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ
С ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Клеммер П. С., Шебанов В. В. 31

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

ПОЛУЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА МЕДНО-ПЕКТИНОВЫХ
НАНОКОМПОЗИТОВ

Серикова Л. В., Худайбергенова Э. М., Ли С. П., Жоробекова Ш. Ж. 41

CONTENTS

BIOLOGICAL SCIENCES

ARTICLE

TRANSFORMATION OF CHLOROPHYLL AND INFLUENCE OF ITS
DERIVATIVES ON FOOD COMPONENTS IN THE PROCESS OF DIGESTION

Koldaev V. M. 5

MEDICAL SCIENCES

ARTICLE

ORGANIZATION OF PALLIATIVE CARE IN RYAZAN

Belykh N. A., Stezhkina E. V. 10

REVIEWS

MODERN METHODS OF GUIDED BONE AND TISSUE REGENERATION
IN THE SURGICAL TREATMENT OF PERIODONTAL DEFECTS

Konovalova E. V., Ivanov P. V., Schetinin V. V., Shastin E. N., Rybas A. R. 16

CHRONIC PAIN SYNDROME: MODERN APPROACHES TO DIAGNOSIS
AND TREATMENT

Shibitova D. V., Pekur I. A., Sayfullina F. R., Zhanakulova Zh. M., Akbolat L. 23

TECHNICAL SCIENCES

ARTICLE

THE ROLE OF SPATIAL DIMENSION IN THE DYNAMICS OF STOCHASTIC
CELLULAR AUTOMATA WITH LOCALIZED INITIAL CONDITIONS

Klemmer P. S., Shebanov V. V. 31

CHEMICAL SCIENCES

ARTICLES

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF COPPER-PECTIN
NANOCOMPOSITES

Serikova L. V., Khudaibergenova E. M., Li S. P., Jorobekova Sh. J. 41

СТАТЬЯ

УДК 615.322



CC BY 4.0

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ХЛОРОФИЛЛА И ВЛИЯНИЕ ЕГО ДЕРИВАТОВ
НА КОМПОНЕНТЫ ПИЩИ В ПРОЦЕССЕ ПИЩЕВАРЕНИЯ****Колдаев В. М.**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный научный центр
биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Российская Федерация, e-mail: kolvm42@rambler.ru*

Пигменты зеленых растений, хлорофиллы, снижают риски многих заболеваний и ежедневно потребляются с пищей, однако процессы их переваривания изучены недостаточно полно. Цель работы состояла в анализе публикаций о превращениях хлорофиллов и влиянии их дериватов на компоненты пищи при пищеварении. В обзоре суммирована информация из библиографических баз Web of Science, Scopus, Google Scholar, Library о трансформациях хлорофиллов, всасывании в желудочно-кишечном тракте и биодоступности. Оральный отдел пищеварительной цепи хлорофиллы проходят без существенных изменений, в кислой среде желудка центральный тетрапиррольный атом магния замещается двумя протонами и хлорофилл превращается в феофитин, который в щелочной среде тонкого кишечника теряет фитол и деградирует до феофорбида. Хлорофилл-*a* превращается в феофорбид в 2,5–9 раз эффективнее, чем хлорофилл-*b*. Нерастворимые в воде продукты превращения хлорофиллов образуют гидрофильные мицеллы, которые всасываются эпителиальными клетками кишечника, а затем с током крови доставляются к органам-мишеням. Кроме того, продукты превращения хлорофиллов снижают активность амилазы и панкреатической липазы, подавляют переваривание полисахаридов и липидов. В дальнейшем было бы целесообразно изучить влияние хлорофиллов на переваривание сопутствующих компонентов пищевого комка.

Ключевые слова: антиоксидант, феофитин, феофорбид, фитол, всасывание, биодоступность

**TRANSFORMATION OF CHLOROPHYLL AND INFLUENCE
OF ITS DERIVATIVES ON FOOD COMPONENTS
IN THE PROCESS OF DIGESTION****Koldaev V. M.**

*Federal State Budgetary Institution of Sciences Federal Scientific Center
of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russian Federation, e-mail: kolvm42@rambler.ru*

Green plant pigments, chlorophylls, reduce the risks of many diseases and are consumed daily in food, but the processes of their digestion have not been fully studied. The purpose of the work was to analyze publications on the transformation of chlorophylls and the influence of their derivatives on food components during digestion. The review summarizes information from the bibliographic databases Web of Science, Scopus, Google Scholar, Library on chlorophyll transformations, absorption in the gastrointestinal tract and bioavailability. In the oral part of the digestive chain, chlorophylls pass through without significant changes; in the acidic environment of the stomach, the central tetrapyrrole magnesium atom is replaced by two protons and chlorophyll is converted into pheophytin, which in the alkaline environment of the small intestine loses phytol and degrades to pheophorbide. Chlorophyll-*a* is converted into pheophorbide 2.5 – 9 times more efficiently compared to chlorophyll-*b*. Water-insoluble chlorophyll conversion products form hydrophilic micelles, which are absorbed by intestinal epithelial cells and then delivered through the bloodstream to target organs. In addition, the products of chlorophyll transformation reduce the activity of amylase and pancreatic lipase and suppress the digestion of polysaccharides and lipids. In the future, it would be advisable to study the effect of chlorophylls on the digestion of accompanying components of the bolus.

Keywords: antioxidant, pheophytin, pheophorbide, phytol, absorption, bioavailability

Введение

Хлорофиллы – зеленые пигменты, по химической природе циклические тетрапирролы с центральным атомом металла, обеспечивают процессы фотосинтеза в высших растениях в двух структурно близких модификациях хлорофилл-*a* и хлорофилл-*b*, отличающихся лишь радикалами во втором пирроле [1]. В составе зеленых овощей хлорофиллы (Хл) ежедневно потребляются с пищей [2], в организме человека прояв-

ляют антиоксидантную активность (АОА), уменьшают риски различных заболеваний [3]. Хотя Хл (табл. 1) являются компонентами повседневного питания и полезны для здоровья, однако процессы их переваривания изучены недостаточно полно.

Результаты исследования превращений Хл в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) представлены в разнообразных публикациях, анализ которых требует специальных подборок, что и послужило поводом к написанию настоящей статьи.

Таблица 1

Содержание хлорофилла в зеленых овощных растениях

Наименование	Хлорофилл, мг/100 г		Наименование	Хлорофилл, мг/100 г	
	<i>a</i>	<i>b</i>		<i>a</i>	<i>b</i>
Шпинат	24–94	14,7–29	Зеленый перец	4,1–5,8	2,8–3,8
Петрушка	47,8	15,4	Зеленый горошек	3,9–7,3	1,2–2,8
Салат латук	18,5–19,9	4,6–10,4	Артишок	3,7–5,3	1,2–10,5
Лук порей	6,63–16,7	2,07–10,3	Огурец с кожурой	2,57	1,02
Фасоль	5,8–24,4	1,67–13	Брюссельская капуста	2,3–5,0	0,9–2,8
Цуккини	4,91	6,8	Сельдерей	1,78	0,52
Китайская капуста	4,1–11,5	1,6–4,7	Брокколи	1,6–12,0	0,5–0,3

Примечание: составлена автором на основе источника [4].

Цель исследования – анализ публикаций о трансформации, биодоступности, всасывании хлорофиллов и влиянии их дериватов на сопутствующие составляющие пищи при переваривании.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели произведен поиск в библиографических базах данных Web of Science, Scopus, Google Scholar, Library, просмотрено 52 источника, для анализа отобрано 15 публикаций, достаточно освещающих результаты исследования по заявленной тематике.

Результаты исследования и их обсуждение

Ввиду важности проблем пищеварения учеными из более чем 45 стран в рамках программы финансирования Европейского сотрудничества в области науки и технологии разработан специальный так называемый протокол INFOGEST, являющийся наиболее широко используемой *in vitro* моделью ЖКТ, имитирующей три фазы: «оральную» (нейтральная среда, слюна), «желудочную» (соляная кислота, pH ≈ 2/пепсин) и «кишечную» (щелочная, pH ≈ 8, желчь/панкреатин). Протокол INFOGEST ориентирован на использование стандартного лабораторного оборудования и растворов, что делает его доступным и обеспечивает сопоставимость результатов исследований [5]; большинство опубликованных в последнее время работ по пищеварению Хл и его биодоступности выполнено на указанной модели.

Первые исследования *in vitro* с использованием листьев шпината [6] выявили, что в «оральной» фазе каких-либо заметных изменений молекул Хл не наблюдается; в «желудочной» фазе в течение одного часа происходит замена центрального атома Mg на два протона H и образование феофитина

почти в 100 % потребленного зеленого пигмента. Поскольку желудочный pH здоровых людей натошак составляет примерно 2–2,5, то предполагается, что обнаруживаемый в фекалиях человека дериват Хл феофитин образуется преимущественно в «желудочной» фазе. Аналогичные исследования *in vitro* на моделях последовательного переваривания свежего и термически обработанного пюре из шпината показали [4], что образовавшиеся феофитины далее в щелочной среде «кишечной» фазы (pH около 8) с отщеплением цепочки полиизопренового хлорофиллового радикала фитола трансформируются в феофорбиды.

Приведенные результаты выявили основные стадии трансформации Хл в ЖКТ, а последующие работы уточняли и расширяли вышесказанное. Так, Chen K. и Rosa M. [7] с целью изучения зависимости переваривания Хл от структуры тетрапиррольного кольца в опытах *in vitro*, используя три вида съедобных водорослей: нори (*Porphyra umbilicalis*), морской салат (*Ulva spinulosa*) и комбу (*Laminaria ochroleuca*), с преимущественным содержанием Хл-*a*, Хл-*a* с Хл-*b* и Хл-*a* с Хл-*c* соответственно, получили, что Хл-*a* трансформируется в феофитин-*a* быстрее в 2,5 и 9 раз по сравнению с более устойчивыми хлорофиллами других модификаций.

Хлорофилл и продукты его трансформации в воде нерастворимы, поэтому вполне естественно в недавнем прошлом возникали сомнения относительно их биодоступности и усвоения людьми. Затем было обнаружено, что дериваты Хл феофитины и феофорбиды способны образовывать в водной среде гидрофильные мицеллы, которые поглощаются, например, клетками Сасо-2 монослойной культуры клеток кишечника до 5–10 % от изначального количества производных Хл [6].

Таблица 2

Состав пищевых продуктов в эксперименте

Пищевой продукт	Клетчатка (%)	Суммарное содержание (%)		
		Жиры	Белки	Углеводы
Оливковое масло	–	100	–	–
Хумус с базиликом	–	23	7	9
Шпинат со сливками	1,4	4,3	1,4	3,7
Овощная паста	–	1,5	11	72
Соус песто	2,6	33	6,5	10
Шоколад с зеленым чаем	–	35	4	58
Сок авокадо	–	2	0,4	8,7
Сок киви	0,6	0,1	0,4	11,4

Примечание: составлена автором на основе источника [15].

Аналогичные данные получены [8] и в опытах с экстрактами сладкого перца на *in vitro* модели, воспроизводящей в общих чертах «желудочную» и «кишечную» фазы пищеварения, а также в экспериментах по перевариванию и всасыванию продуктов распада Хл-а на мидиях *Mytilus edulis* L., потребляющих водоросли *Phaeodactylum tricornutum* [9], на веслоногих рачках-копеподах *Calanus pacificus*, питающихся зелеными микроводорослями [10]. Предварительная термическая обработка хлорофилл-содержащих водорослей нори (преимущественно Хл-а), морского салата (Хл-а и Хл-б) и комбу (Хл-с), как показано на пищеварительной модели *in vitro* [11], практически не влияет на образование мицелл производными Хл-б и Хл-с и снижает производными Хл-а. Кроме того, в опытах по перевариванию экстрактов из листьев шпината (*Spinacia oleracea* L.) мышами разного возраста получено, что микрофлора толстого кишечника способствует образованию феофорбидов и, соответственно, мицеллизации [12].

Поскольку хлорофиллы проявляют антиоксидантные свойства [2], то могут, вероятно, вовлекаться как реагенты в химические пищеварительные процессы. Вопросы взаимодействия Хл с сопутствующими компонентами пищи в условиях ЖКТ только начинают изучаться. Например, Wang X. и соавт. [13] в эксперименте *in vitro* изучали влияние Хл-а и его производного феофитина-а на переваривание крахмала и показали, что они значительно уменьшают выход продуктов гидролиза полисахарида, снижая активность α -амилазы и α -глюкозидазы. При этом с помощью сканирующей электронной микроскопии обнаружено, что Хл абсорбируется на поверх-

ности крахмальных гранул, спектроскопический анализ и молекулярный докинг продемонстрировали, что фитоловая полиизопреновая цепочка Хл образует двойную спиральную структуру с крахмалом и тем самым препятствует его контактам с ферментами; вместе с тем, порфириновое кольцо Хл, взаимодействуя с аминокислотными остатками α -амилазы и α -глюкозидазы, ингибирует их активность. Авторы полагают, что полученные результаты могут использоваться в разработках богатых Хл крахмалистых продуктов для диабетиков и людей с гипергликемией.

В другом исследовании [14] показано, что добавление Хл в потребляемые пищевые продукты снижает высвобождение жирных кислот, а также уменьшает активности липаз поджелудочной железы на моделях, имитирующих среду ЖКТ. Обнаружено, что ингибирование активности панкреатической липазы в «кишечной» фазе пищеварения вызывается связыванием феофитина с этим ферментом с высокой аффинностью. Исследование показало также, что Хл не только снижает активности липаз, но может уменьшать потребление жиров. Последнее, по мнению авторов, открывает перспективы разработки специальных продуктов для применения в диетах, направленных на профилактику ожирения.

В некоторых работах приводятся также сведения о возможном в процессе пищеварения связывании хлорофиллами и металлохлорофиллами различных токсинов. Например, показано [4] на животных и людях, что производные Хл способствуют выведению диоксинов с фекалиями. Аналогичные данные получены в отношении гетероциклических ароматических аминов, полиароматических углеводородов (образу-

ются, например, при копчении, обжаривании мяса) и микотоксинов, продуцируемых *Aspergillus flavus* и *Aspergillus parasiticus* (плесневые грибки, способные вызывать рак печени). В совокупности имеющиеся данные свидетельствуют о снижении уровня токсинов производными Хл и металлохлорофиллинов за счет прямого связывания, что, как считают авторы, представляет интерес для токсикологии.

Проводились исследования [15] с использованием широкого ассортимента приобретенных в супермаркетах различных коммерческих продуктов (табл. 2), выбор которых основывался на содержаниях белков, жиров и углеводов. Показано на моделях *in vitro*, что переваривание продуктов с высоким содержанием белка сопровождается наибольшим, а жиросодержащих – низким процентом мицеллизации хлорофиллов и их дериватов. При этом стабильность Хл варьирует от 15 до 85 % независимо от пищевой матрицы, но коррелирует с концентрацией содержащейся в продуктах поваренной соли.

Заключение

Библиография последнего десятилетия свидетельствует, что зеленые овощные растения все шире используются в пищевых рационах, чему немало способствуют и рекомендации диетологов; полезные для здоровья Хл становятся неременным компонентом питания, и, конечно, возникает необходимость исследования превращений в ЖКТ и влияния этих зеленых пигментов на переваривание сопутствующих компонентов различного состава пищи.

Для исследования с этой целью разработаны специальные «пищеварительные» модели. Используя модель, имитирующую *in vitro* процессы пищеварения в желудке и тонком кишечнике, продемонстрировано, что потребляемые с пищей природные Хл в кислой среде желудка превращаются в производные, не содержащие металлов феофитины, а в кишечнике – в лишенные фитолов феофорбиды.

Судя по результатам исследований, превращения Хл-а в феофетин происходят в несколько раз быстрее по сравнению Хл-б вопреки теоретическим представлениям энергетической выгоды замены атома Mg на два протона H. Очевидно, реакционная способность Хл зависит не только от структуры макроцикла, но и от периферических групп. Так, при одинаковой структуре макроцикла Хл-а и Хл-б имеют разные радикалы во втором пирроле, и, вероятно, по сравнению с метильной группой, формильная снижает восприимчивость атомов

азота N в макроцикле в силу своих более активных электроакцепторных свойств, поэтому Хл-б в меньшей степени подвержен феофитизации (замещению Mg на 2H) и, соответственно, по сравнению с Хл-а, оказывается более стабильным в ЖКТ.

Наиболее существенным достижением исследований трансформации Хл в ЖКТ является обнаружение гидрофильной мицеллизации нерастворимых в воде продуктов деградации хлорофиллов, благодаря чему они могут поглощаться энтероцитами кишечника.

Сложный профиль хлорофиллов съедобных водорослей позволил изучить различное поведение при переваривании хлорофилловых производных с разной структурой макроциклов. В процессе переваривания *in vitro* Хл-а более склонны к феофитинизации, по сравнению с Хл-б. Предполагается, что реакции окисления происходили легче для хлорофиллов, хелатированных металлами, чем нехелатированных. Согласно значениям скорости восстановления, возможно, что внеклеточный матрикс водорослей является определяющим фактором скорости восстановления хлорофиллов после имитированного пищеварения. Таким образом, химическая структура фитохимических веществ, как и природа пищевой матрицы, имеют решающее значение для стабильности при переваривании Хл *in vitro*.

Поскольку Хл имеют высокую АОА, то принимают участие в химических процессах пищеварения. Однако информация о влиянии Хл на сопутствующие компоненты пищи в ЖКТ пока довольно ограничена, в силу чего сделать какие-либо конструктивные выводы не представляется возможным, но, безусловно, представляет интерес в будущем, восполняя этот пробел, направить усилия исследователей на изучение взаимодействия Хл в условиях ЖКТ с главными компонентами пищи – белками, углеводами и жирами.

В целом в публикациях последних лет намечены основные пути переваривания и метаболизма Хл при потреблении с пищей, остается детализация для практического применения.

В завершение можно сделать следующие выводы:

1. В кислой среде «желудочной» фазы пищеварения центральный атом Mg тетрапиррольного цикла зеленого пигмента замещается двумя протонами и Хл превращается в феофетин, который в щелочной среде «кишечной» фазы с отщеплением полиопренового фитола трансформируется в феофорбид.

2. Гидрофильная мицеллизация нерастворимых в воде дериватов Хл обеспечива-ет их поглощение энтероцитами.

3. В будущем следует направить усилия на исследование участия Хл в переварива-нии сопутствующих компонентов пищи.

Список литературы

1. Pareek S., Sagar N. A., Sharma S., Kumar V., Agarwal T., González-Aguilar G. A., Yahia E.M. Chlorophylls: Chemistry and Biological Functions // *Fruit and vegetable phytochemicals*. 2017. P. 269–284. DOI: 10.1002/9781119158042.ch14.
2. Yang Z., Li F., Shen S., Wang X., Ibrahim A. N., Zheng H., Zhang J., Ji X., Liao X., Zhang Y. Natural chlorophyll: a review of analysis methods, health benefits, and stabilization strategies // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2025. Vol. 65. Is. 16. P. 3069–3083. DOI: 10.1080/10408398.2024.2356259.
3. Колдаев В. М. Лечебно-профилактические эффек-ты хлорофиллов при наиболее угрожающих патологиче-ских состояниях // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2025. № 5. С. 25–29. DOI: 10.17513/mjpf.13725.
4. Zhong S., Bird A., Kopec R.E. The metabolism and potential bioactivity of chlorophyll and metallo-chlorophyll derivatives in the gastrointestinal tract // *Molecular nutrition food research*. 2021. Vol. 65. Is. 7. P. 1–11. DOI: 10.1002/mnfr.202000761.
5. Minekus M., Alming M., Alvito P., Ballance S., Bohn T. et al. A standardised static in vitro digestion method suitable for food – an international consensus // *Food and function*. 2014. Vol. 5. Is. 6. P. 1113–1124. DOI: 10.1039/c3fo60702j.
6. Ferruzzi M. G., Failla M. L., Schwartz S. J. Assessment of degradation and intestinal cell uptake of carotenoids and chlorophyll derivatives from spinach puree using an *in vitro* digestion and Caco-2 human cell model // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2001. Vol. 49. Is. 4. P. 2082–2089. DOI: 10.1021/jf000775r.
7. Chen K., Roca M. *In vitro* digestion of chlorophyll pigments from edible seaweeds // *Journal of functional foods*. 2018. Vol. 40. P. 400–407. DOI: 10.1016/j.jff.2017.11.030.
8. Roca M. *In vitro* digestive stability and uptake by Caco-2 human intestinal cells of nonfluorescent chlorophyll catabolites // *Food chemistry*. 2012. Vol. 30. Is. 1. P. 134–138. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.07.016.
9. Hawkins A. J. S., Bayne B. L., Mantoura R. F. C., Llewellyn C. A., Navarro E. Chlorophyll degradation and absorption throughout the digestive system of the blue mussel *Mytilus edulis* L. // *Journal of experimental marine biology and ecology*. 1986. Vol. 96. Is. 3. P. 213–223. DOI: 10.1016/0022-0981(86)90204-2.
10. Penry D. L., Frost B. W. Chlorophyll a degradation by *Calanus pacificus*: dependence on ingestion rate and digestive acclimation to food resources // *Limnology and oceanography*. 1991. Vol. 36. Is. 1. P. 147–159. DOI: 10.4319/lo.1991.36.1.0147.
11. Chen K., Roca M. Cooking effects on bioaccessibility of chlorophyll pigments of the main edible seaweeds // *Food chemistry*. 2019. Vol. 295. P. 101–109. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.05.092.
12. Li Y., Lu F., Wang X., Hu X., Liao X., Zhang Y. Biological transformation of chlorophyll-rich spinach (*Spinacia oleracea* L.) extracts under *in vitro* gastrointestinal digestion and colonic fermentation // *Food research international*. 2021. Vol. 139: 109941. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109941.
13. Wang X., Yang Z., Shen S., Ji X., Chen F., Liao X., Zhang H., Zhang Y. Inhibitory effects of chlorophylls and its derivative on starch digestion *in vitro* // *Food chemistry*. 2023. Vol. 413. P. 135377. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2022.135377.
14. Wang X., Li Y., Shen S., Yang Z., Zhang H., Zhang Y. Chlorophyll inhibits the digestion of soybean oil in simulated human gastrointestinal system // *Nutrients*. 2022. Vol. 14. Is. 9. P. 1749. DOI: 10.3390/nu14091749.
15. Viera I., Herrera M., Roca M. Influence of food composition on chlorophyll bioaccessibility // *Food chemistry*. 2022. Vol. 386. P. 132805. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132805.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Статья соответствует общей тематике ФНИЦ ДВО РАН «Интродукция, эко-логия и охрана флоры и фауны юга Дальнего Востока России», работа выполнена согласно госу-дарственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 124012200183-8).

Financing: The article corresponds to the general theme of the Federal Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, e-mail: kolvm42@rambler.ru RAS “Introduction, ecology and protection of flora and fauna of the southern Far East of Russia”, completed according to the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 124012200183-8).

СТАТЬЯ

УДК 616-039.74-08:364.4(470.313)



CC BY 4.0

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПАЛЛИАТИВНОЙ
МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ В РЯЗАНИ****Белых Н. А. ORCID ID 0000-0002-5533-0205,
Стежкина Е. В. ORCID ID 0000-0002-1806-0787**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Рязанский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, Рязань, Российская Федерация,
e-mail: pedyatrI@yandex.ru*

Рязанская область относится к регионам с высокой долей населения старше трудоспособного возраста (28,7% по данным Рязаньстата на 1 января 2025 г.), что определяет устойчивый рост потребности в паллиативной медицинской помощи (ПМП). Цель – проанализировать организационную структуру, кадровое обеспечение и показатели деятельности ПМП в регионе за 2013–2025 гг., выявить актуальные проблемы и направления развития. Проведен ретроспективный контент-анализ нормативных правовых актов, статистических сборников и научных публикаций. Поиск литературы осуществлялся в базах данных eLibrary.ru, PubMed и справочно-правовых системах «КонсультантПлюс», «Гарант» за период с 2015 по 2025 г. Ключевые слова: паллиативная медицинская помощь, организация, Рязанская область, кадры, обезболивание. Дополнительно проанализированы региональные нормативные документы и аналитический отчет фонда «Вместе против рака». Всего идентифицировано 28 публикаций и документов, из которых после исключения дубликатов и материалов, не соответствующих критериям, в итоговый анализ включено 15 источников. В регионе сформирована трехуровневая система ПМП: первый уровень – 11 кабинетов и 14 выездных бригад; второй – отделения на 90 коек для взрослых и 13 для детей; третий – 173 койки сестринского ухода. В 2023 г. в стационарах пролечено 1276 взрослых и 147 детей, выполнено 6967 выездов, средняя длительность пребывания на взрослой паллиативной койке – 24,1 дня, летальность – 35%. Укомплектованность врачами не превышает 67,7%. Инфраструктурные показатели сопоставимы с другими регионами РФ. Независимый аудит выявил несоответствия региональных актов федеральному законодательству и поставил под сомнение заявляемый стопроцентный охват нуждающихся. По имеющимся данным, в области за 2020–2025 гг. достигнут заметный прогресс в развитии ПМП, однако необходимы дальнейшее укрепление кадрового потенциала, гармонизация правовой базы и повышение достоверности статистической отчетности.

Ключевые слова: паллиативная медицинская помощь, организация здравоохранения, Рязанская область, хоспис, выездная патронажная служба, обезболивание, региональная программа

ORGANIZATION OF PALLIATIVE CARE IN RYAZAN**Belykh N. A. ORCID ID 0000-0002-5533-0205,
Stezhkina E. V. ORCID ID 0000-0002-1806-0787**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Ryazan State Medical University named after Academician I. P. Pavlov”
of the Ministry of Health of the Russian Federation, Ryazan, Russian Federation,
e-mail: pedyatrI@yandex.ru*

The Ryazan region has a high proportion of elderly residents (28.7% over working age in 2025, Ryazanstat), leading to a growing need for palliative care. Objective: to analyze the organizational structure, staffing, and performance of palliative care in 2013–2025. A retrospective content analysis of regulations, statistical compilations, and scientific publications was conducted. Literature search was performed in eLibrary.ru, PubMed, ConsultantPlus, and Garant databases for 2015–2025. Keywords: “palliative care”, “organization”, “Ryazan region”, “staffing”, “pain management”. Regional legal documents and an analytical report by the “Together Against Cancer” Foundation were additionally analyzed. A total of 28 publications and documents were identified; after removing duplicates and irrelevant materials, 15 sources were included. A three-tier system has been established: tier 1 – 11 outpatient offices and 14 mobile teams; tier 2 – 90 adult and 13 pediatric inpatient beds; tier 3 – 173 nursing beds. In 2023, 1,276 adults and 147 children were treated in inpatient units, 6,967 home visits were made, mean length of stay was 24.1 days, mortality 35%. Physician staffing is 67.7%. Infrastructure indicators are comparable with other regions. An independent audit revealed discrepancies between regional and federal legislation and cast doubt on the claimed 100% coverage. Available data suggest significant progress in 2020–2025; further efforts should focus on workforce development, legal harmonization, and improvement of statistical reporting.

Keywords: palliative care, healthcare organization, Ryazan region, hospice, mobile team, pain management, regional program

Введение

Паллиативная медицинская помощь (ПМП) – междисциплинарная область, направленная на улучшение качества жизни пациентов с неизлечимыми прогрессирующими заболеваниями и психосоциальную поддержку их семей [1]. Глобальная потребность в ПМП оценивается в 56,8 млн чел. ежегодно, из которых лишь 14% получают необходимую помощь [2]. В Российской Федерации, по данным экспертов, в ПМП нуждаются около 1,3 млн чел., при этом реальный охват не превышает 15% [1, 2]. Федеральную нормативную основу службы составляют Федеральный закон № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» [3], приказы Минздрава России, регламентирующие порядок оказания ПМП взрослому населению (№ 187н) [4] и детям (№ 193н) [5]. Приказом № 345н/372н от 31 мая 2019 г. впервые были утверждены единые правила организации ПМП, включая межведомственное взаимодействие [6]; в 2025 г. им на смену пришел приказ № 208н/243н, детализировавший условия сотрудничества медицинских организаций с учреждениями социального обслуживания и некоммерческими организациями [7].

Рязанская область – регион Центрального федерального округа с выраженной тенденцией к демографическому старению. Согласно официальным статистическим данным, на 1 января 2025 г. доля лиц старше трудоспособного возраста достигла 28,7% [8]. Ежегодно в области выявляется около 4,8 тыс. новых случаев злокачественных новообразований [9]. Расчетная потребность в ПМП, выполненная по методике Минздрава России (67% от числа умерших), составляет 11 800 чел., в том числе 48 детей [10]. Первые шаги по институционализации ПМП в регионе были сделаны еще в 2013 г., когда приказом областного Минздрава были развернуты две детские паллиативные койки. Однако целостная система начала формироваться лишь с 2020 г., после утверждения региональной программы «Развитие системы оказания паллиативной медицинской помощи» (распоряжение Правительства Рязанской области от 03 сентября 2020 г. № 418-р). Программа, пролонгированная на 2024–2025 гг., предусматривает поэтапное увеличение числа коек, выездных бригад и охвата нуждающихся до 90% [10]. Дополнительные аспекты организации помощи детям были закреплены приказом областного Минздрава № 1580 от 22 октября 2020 г. [11]. Несмотря на заметный прогресс, работ, посвященных комплексному анализу организации ПМП в Рязанской об-

ласти, крайне мало, что обусловило **цель исследования** – проанализировать организационную структуру, кадровое обеспечение и ключевые показатели деятельности ПМП в регионе за период с 2013 по 2025 г., выявить сохраняющиеся проблемы и определить приоритетные направления развития.

Материалы и методы исследования

Проведен ретроспективный контент-анализ нормативных правовых актов, статистических сборников и научных публикаций. Поиск литературы выполнялся в базах данных eLibrary.ru, PubMed и справочно-правовых системах «КонсультантПлюс», «Гарант» за период с 2015 по 2025 г. Ключевые слова: паллиативная медицинская помощь, организация, Рязанская область, кадры, обезбоживание. Критериями включения служили оригинальные исследования, обзоры, аналитические статьи и нормативные документы, содержащие количественные или структурные данные о региональных моделях ПМП. Дополнительно проанализированы региональные нормативные документы (программа развития ПМП на 2024–2025 гг., приказы Минздрава Рязанской области) и аналитический отчет фонда «Вместе против рака», содержащий независимый аудит 12 субъектов РФ. Всего идентифицировано 28 публикаций и документов, из которых после удаления дубликатов и исключения материалов, не соответствующих теме, в итоговый анализ включено 15 источников. Извлечение данных проводилось двумя исследователями независимо с фиксацией количественных показателей в стандартизированной форме.

Результаты исследования и их обсуждение

Нормативно-правовая база и этапы становления. Федеральный уровень регулирования ПМП представлен приказами № 187н, 193н, а также новым приказом № 208н/243н [7]. В Рязанской области, помимо базовой программы [10], принят ряд ведомственных документов, направленных на детализацию маршрутизации и условий оказания помощи. Так, приказ № 1954 от 01 ноября 2017 г. определил порядок амбулаторной ПМП на базе областной клинической больницы, а приказ № 617 от 03 апреля 2018 г. (в ред. приказа № 2170 от 20 ноября 2018 г.) – амбулаторную ПМП детям на базе ОДКБ имени Н. В. Дмитриевой. Приказ № 1580 от 22 октября 2020 г. утвердил маршрутизацию детского населения [11], а приказ № 94 от 20 января 2022 г. – единые подходы к оказанию ПМП в амбулаторных условиях на всей территории области.

Таблица 1

Структура ПМП Рязанской области (по данным на 2023 г.)

Уровень	Подразделения	Коечная мощность / объем
1й – амбулаторный	Кабинеты ПМП – 11; выездные патронажные бригады – 13 взрослых, 1 детская	10 191 посещение кабинетов; 6967 выездов бригад (2023)
2й – стационарный	Отделения ПМП: ГБ № 10 (30 коек), Рыбновская ЦРБ (30), ГКБ № 4 (15), Шацкая психиатрическая больница (15) – всего 90 взрослых коек; детские койки: ОДКБ (8), Дом ребенка (5) – 13 коек	1276 взрослых и 147 детей пролечено в 2023 г.
3й – реабилитационно-уходовой	Койки сестринского ухода в 13 ЦРБ	173 койки; 3500 пациентов в 2023 г.

Примечание: составлена авторами на основе источника [10]

Таким образом, к 2022 г. в регионе была сформирована достаточно полная нормативная база, однако, как показал независимый аудит [12], ряд ее положений не соответствовал федеральным требованиям. Инфраструктура и трехуровневая система. В настоящее время ПМП в Рязанской области организована по трехуровневому принципу (табл. 1). Первый уровень – амбулаторное звено – по состоянию на 2023 г. включал 11 кабинетов ПМП и 14 выездных патронажных бригад (13 для взрослых, 1 для детей). Второй уровень – стационарный – был представлен четырьмя отделениями ПМП для взрослых суммарной мощностью 90 коек (головное отделение на 30 коек в ГБ № 10, а также отделения в Рыбновской ЦРБ, ГКБ № 4 и Шацкой психиатрической больнице) и 13 детскими койками (8 в ОДКБ и 5 в Рязанском доме ребенка). Третий уровень – койки сестринского ухода – насчитывал 173 койки в 13 центральных районных больницах [10]. По сравнению с 2021 г., когда, по данным аудита, функционировало лишь 9 кабинетов, 2 бригады и 177 коек [12], произошло значительное расширение сети: обеспеченность койками на 10 000 населения выросла с 1,63 до 2,59. Маршрутизация пациентов строго регламентирована. Врач кабинета ПМП или выездной бригады проводит первичную оценку состояния; при невозможности адекватного контроля симптомов на дому пациент направляется в стационарное отделение (второй уровень). После стабилизации состояния больной переводится на койки сестринского ухода (третий уровень) или возвращается под наблюдение выездной бригады. Критерии перевода детализированы в приказе Минздрава Рязанской области от 04 декабря 2023 г. № 2168 [10].

Охват и динамика показателей. В официальных отчетах регионального Минздрава за 2018–2021 гг. декларировался стопро-

центный охват нуждающихся ПМП [12]. Однако сопоставление с федеральными данными и внутренний анализ программы показывают, что эта цифра, по-видимому, завышена: методика расчета не была верифицирована, а часть пациентов, формально включенных в регистр, фактически не получали специализированной помощи. Сама региональная программа на 2024–2025 гг. уже оперирует более реалистичным показателем – 65 % за 2023 г. с перспективой достижения 90 % к 2025 г. [10]. Основные показатели деятельности. С 2022 по 2023 г. зафиксирован выраженный рост всех операционных индикаторов. Число пациентов, пролеченных на паллиативных койках для взрослых, увеличилось на 31 % (с 973 до 1276), на детских койках – в 2,1 раза (с 71 до 147), на койках сестринского ухода – на 91 % (с 1830 до 3500). Количество выездов бригад выросло со 3184 до 6967 (+118,8 %). Средняя длительность пребывания на взрослой паллиативной койке составила 24,1 дня при нормативе 30 дней; на детской – 32,8 дня; на койках сестринского ухода – 16,9 дня. Летальность в отделениях ПМП для взрослых достигла 35 %, для детей – 8,8 %, в отделениях сестринского ухода – 2,4 % [10]. Ведущим стационарным звеном является отделение на 30 коек, открытое в 2022 г. в ГБУ РО «Городская больница № 10». С момента открытия через него прошло более 1800 пациентов, укомплектованность врачами здесь составляла 71,1 %. При отделении с 2023 г. действует проект «Сестры милосердия» с участием добровольцев Казанского женского монастыря, что позволило расширить объем немедицинского ухода. Кадровое обеспечение. Укомплектованность врачами по всем структурным подразделениям ПМП не превышает 67,7 %, средним медицинским персоналом – 73,4 % [10].

Таблица 2

Показатели ПМП в отдельных регионах РФ (2021 г.)

Показатель	Рязанская область	Республика Башкортостан	Севастополь
Доля получивших ПМП от числа нуждающихся, %	100 (заявлено)	80 (2020 г.)	70
Паллиативные койки (взрослые + детские)	177	918	41
Обеспеченность койками на 10 000 населения	1,63	0,35	0,8
Выездные патронажные бригады (взрослые / детские)	1 / 1	41 (совместные)	1 / 1
Укомплектованность врачами ПМП, %	67,7 (2023 г.)	64,8*	66,7**

Примечание: * – рассчитано как 100% – 35,2% (дефицит врачей в амбулаторном звене); ** – 12 физических лиц из 18 штатных должностей.

Составлена авторами на основе источников: данные по Рязанской области – [10, 12]; по Башкортостану и Севастополю – [12].

При этом независимый аудит показал, что в отдельных подразделениях дефицит врачей достигает 100%, а коэффициент совместительства у врачей – 1,47 [12, 13]. За период с 2020 по 2023 г. обучение по программам дополнительного профессионального образования по паллиативной медицине прошли 102 врача и 214 медицинских сестер, преимущественно на базе РязГМУ и Рязанского медицинского колледжа [10]. Однако этих объемов подготовки явно недостаточно для покрытия кадрового дефицита, особенно в сельских районах. Лекарственное обеспечение [14, 15]. Отпуск наркотических анальгетиков осуществляется через 19 аптечных пунктов, расположенных в районных центрах, что обеспечивает минимальную территориальную доступность. В 2023 г. в рамках федеральной субсидии было закуплено 9016 упаковок наркотических лекарственных препаратов на сумму 12,3 млн руб. Полнота выборки неинвазивных форм пролонгированного действия составила 90%, короткого действия – 70% [10]. Вместе с тем независимое исследование выявило, что в региональных нормативных актах длительное время сохранялись дискриминационные положения, ограничивающие назначение опиоидов при ВИЧ-инфекции и ряде других состояний [12]. Кроме того, отсутствие аптечного изготовления наркотических препаратов (особенно детских форм) и сложности с выпиской рецептов врачами первичного звена остаются серьезными барьерами.

Сравнение с другими регионами. Сопоставление с регионами, по которым в отчете фонда «Вместе против рака» приведены полные данные (Республика Башкортостан и г. Севастополь), показывает неоднозначную картину (табл. 2). Обеспеченность пал-

лиативными койками в Рязанской области (1,63 на 10 000 в 2021 г.) была выше, чем в Севастополе (0,8), но значительно уступала Башкортостану (2,3). Однако число выездных бригад – всего по одной взрослой и детской – было минимальным среди сравниваемых субъектов, что резко контрастирует с 41 выездной службой в Башкортостане. Заявляемый полный (100%) охват резко диссонирует с 70% в Севастополе и 80% в Башкортостане, что само по себе вызывает сомнения в его достоверности.

Проведенный анализ подтверждает, что за последние 5 лет в Рязанской области проделана значительная работа по формированию системы ПМП. Тем не менее сохраняется комплекс взаимосвязанных проблем, характерных для многих регионов России [13, 14]. Прежде всего обращает на себя внимание критический дисбаланс между стационарным и амбулаторным секторами. Наличие 263 коек стационарного и уходового профиля при лишь двух выездных бригадах (по состоянию на 2021 г.) указывает на доминирование дорогостоящей стационарцентричной модели, в то время как современные подходы предполагают приоритетное развитие помощи на дому. Даже с учетом увеличения числа бригад до 14 к 2023 г., их количество в расчете на 100 000 взрослого населения (1,23) лишь приближается к целевому показателю, но все еще недостаточно для полноценного охвата, особенно в сельских территориях, где проживает почти треть населения области. Кадровый дефицит остается ключевым ограничением. Укомплектованность врачами на уровне 67,7% и коэффициент совместительства 1,47 создают предпосылки для профессионального выгорания и снижения качества помощи. Особенно остро ситу-

ация стоит в сельских подразделениях, где, по данным аудита, дефицит достигает 100 % [12]. Несмотря на усилия по обучению, число подготовленных специалистов явно уступает потребности; необходимы системные меры по целевой подготовке кадров, в том числе открытие специализированной ординатуры на базе РязГМУ и внедрение дистанционных образовательных модулей. Проблема доступности опиоидных анальгетиков, хотя и признается на всех уровнях, продолжает оставаться острой. Наличие дискриминационных ограничений в региональных актах (запрет на назначение наркотических препаратов при ВИЧ-инфекции, онкологических заболеваниях вне терминальной стадии), выявленных аудитом [12], прямо противоречит федеральному законодательству и клиническим рекомендациям.

Независимый правовой анализ [12] вскрыл целый ряд других несоответствий: отсутствие в нормативных документах дневного стационара как условия оказания ПМП, некорректные наименования структурных подразделений, неправильные формы информированного добровольного согласия. Эти дефекты не только нарушают права пациентов, но и создают юридические риски для медицинских организаций. Особое беспокойство вызывает недостоверная статистическая отчетность: заявляемый стопроцентный охват при фактическом получении ПМП лишь каждым вторым-третьим нуждающимся искажает картину для федеральных органов управления и препятствует адекватному планированию ресурсов.

Для дальнейшего развития системы ПМП в Рязанской области целесообразно реализовать комплекс мероприятий: 1) привести региональные нормативные акты в полное соответствие с требованиями приказов № 208н/243н и 345н/372н, ликвидировав дискриминационные ограничения и добавив дневной стационар; 2) разработать и утвердить план поэтапного увеличения числа выездных бригад, особенно в районах с низкой транспортной доступностью; 3) обеспечить целевое обучение и привлечение кадров, включая меры социальной поддержки для врачей и медицинских сестер, работающих в сельской местности; 4) внедрить телемедицинские технологии для дистанционного консультирования паллиативных пациентов и их родственников; 5) создать единый региональный регистр нуждающихся в ПМП с верифицируемыми критериями включения и прозрачной системой отчетности.

Работа опирается на официальные статистические сборники и ведомственные отчеты, что не исключает информационных

искажений. Сравнение с другими регионами (табл. 2) носит иллюстративный характер, прямое статистическое сопоставление не проводилось.

Заключение

По имеющимся данным, с учетом как официальной статистики, так и результатов независимого аудита, можно предположить, что в Рязанской области за 2020–2025 гг. создана и развивается трехуровневая система ПМП, включающая стационарное, амбулаторное и реабилитационно-уходовое звенья. Основные операционные показатели демонстрируют устойчивый рост, однако заявленные показатели охвата нуждаются в верификации, а региональная нормативная база – в существенной корректировке. Приоритетными задачами остаются укрепление кадрового потенциала, повышение доступности обезболивания, внедрение телемедицинских технологий и гармонизация правового регулирования.

Список литературы

1. World Health Organization. Palliative Care. Fact sheet. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/palliative-care> (дата обращения: 25.05.2026).
2. Connor S. R., Downing J., Marston J. Estimating the Global Need for Palliative Care for Children: A Cross-sectional Analysis // Journal of Pain and Symptom Management. 2017. Vol. 53. № 2. P. 171–177. DOI: 10.1016/j.jpainsymman.2016.08.020.
3. Российская Федерация. Законы. Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации: Федеральный закон № 323-ФЗ: принят Государственной Думой 1 ноября 2011 г.; одобрен Советом Федерации 9 ноября 2011 г.; послед. ред. // КонсультантПлюс. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121895/ (дата обращения: 25.05.2026).
4. Приказ Минздрава России от 14 апреля 2015 г. № 187н «Об утверждении Порядка оказания паллиативной медицинской помощи взрослому населению» [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=319449> (дата обращения: 25.05.2026).
5. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 14 апреля 2015 г. № 193н «Об утверждении Порядка оказания паллиативной медицинской помощи детям» // Гарант.ру. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71022908/> (дата обращения: 25.05.2026).
6. Приказ Минздрава России № 345н, Минтруда России № 372н от 31 мая 2019 г. «Об утверждении Положения об организации оказания паллиативной медицинской помощи...» // Гарант.ру: информационно-правовой портал. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72180964/> (дата обращения: 25.05.2026).
7. Приказ Минздрава России № 208н, Минтруда России № 243н от 14 апреля 2025 г. «Об утверждении Положения об организации оказания паллиативной медицинской помощи...» (зарегистрировано в Минюсте России 28 мая 2025 г. № 82392) // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_506447/ (дата обращения: 25.05.2026).
8. Рязанская область в цифрах. 2025: Краткий статистический сборник / Рязаньстат. Рязань, 2025. 169 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://youthlib.mirea.ru/ru/resource/6810> (дата обращения: 25.05.2026).

9. Рязанская область в 2024 году: статистический ежегодник. 2025: в 2 т. Т. 2 / Рязаньстат. Рязань, 2025. 208 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://62.rosstat.gov.ru/statpublications/document/43911> (дата обращения: 25.05.2026).

10. Региональная программа Рязанской области «Развитие системы оказания паллиативной медицинской помощи» на 2024–2025 годы: утв. распоряжением Правительства Рязанской области от 05 июля 2024 г. № 399-р. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/409333806/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения: 25.05.2026).

11. Приказ Министерства здравоохранения Рязанской области от 22 октября 2020 г. № 1580 «Об организации оказания паллиативной медицинской помощи детскому населению на территории Рязанской области». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/574867379> (дата обращения: 25.05.2026).

12. Фонд «Вместе против рака». Организация оказания и оплаты паллиативной медицинской помощи в регионах РФ: аналитико-правовое исследование. 2022. 492 с. [Элек-

тронный ресурс]. URL: <https://protiv-raka.ru/wp-content/uploads/2023/03/analiticheski-pravovoe-issledovanie.pdf> (дата обращения: 25.05.2026).

13. Новиков Г. А., Введенская Е. С., Вайсман М. А., Рудой С. В. История развития паллиативной медицинской помощи в Российской Федерации // Паллиативная медицина и реабилитация. 2020. № 2. С. 49–55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=4377619> (дата обращения: 26.05.2026). EDN: AFKCCQH.

14. Фадеева Е. В. Паллиативная помощь в России: состояние и проблемы // Социологическая наука и социальная практика. 2019. Т. 7. № 3. С. 109–119. DOI: 10.19181/snsp.2019.7.3.6692.

15. План мероприятий («дорожная карта») «Повышение качества и доступности паллиативной медицинской помощи» до 2024 года (утвержден Правительством РФ 28 июля 2020 г. за № 6551 п-П12) URL: <http://static.government.ru/media/files/E6NYAsjmdVYjU7ZKQnAbleEVE8jdEjMr.pdf> (дата обращения: 25.01.2022).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАПРАВЛЕННОЙ КОСТНОЙ И ТКАНЕВОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ В ХИРУРГИЧЕСКОМ ЛЕЧЕНИИ ПАРОДОНТАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ

¹Коновалова Е. В. ORCID ID 0000-0002-5020-6619,

¹Иванов П. В. ORCID ID 0000-0002-4323-7943, ²Щетинин В. В.,

³Шастин Е. Н. ORCID ID 0009-0008-5660-9276, ¹Рыбас А. Р.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», Пенза, Российская Федерация, e-mail: udaltsovakaterina@mail.ru

²Общество с ограниченной ответственностью

«Центр имплантологии и эстетической медицины «ДЕНТОРА», Российская Федерация;

³Общество с ограниченной ответственностью «БАЛДАР», Российская Федерация

Пародонтит относится к группе хронических воспалительных заболеваний, сопровождающихся разрушением опорных тканей зуба, включая цемент корня, периодонтальную связку и альвеолярную кость. Без своевременного и рационального лечения данная патология становится основной причиной потери зубов у взрослого населения, что в последующем провоцирует развитие серьезных ортопедических и ортодонтических проблем. Цель обзора – анализ современных методов регенеративной пародонтальной хирургии, включая направленную костную регенерацию (НКТР) и направленную тканевую регенерацию (НТТР), при хирургическом лечении пародонтальных дефектов костной ткани на основе данных литературы. Материалы и методы: проведен аналитический обзор публикаций в базах PubMed, Scopus, e-Library. Изучались статьи за последние 20 лет с акцентом на работы последних 10 лет по ключевым словам на русском и английском языках: «пародонтит», «пародонтальный дефект», «направленная костная регенерация», «направленная тканевая регенерация», «пародонтальные мембраны», «регенеративная пародонтальная хирургия», «periodontitis», «periodontal defect», «guided bone regeneration», «guided tissue regeneration», «periodontal membranes», «regenerative periodontal surgery». Результаты: комбинированные подходы, а именно использование барьерных мембран в сочетании с костными трансплантатами и биологическими факторами, по данным ряда обзоров и клинических исследований, могут способствовать более благоприятному исходу регенерации утраченных тканей. Асимметричные резорбируемые мембраны и тканевая инженерия с использованием стволовых клеток периодонтальной связки представляют перспективные направления при лечении пародонтальных дефектов сложной морфологии. Заключение: несмотря на значительный прогресс в хирургической пародонтологии, достижение полноценной функциональной регенерации пародонта остается сложной задачей, требующей дальнейших исследований.

Ключевые слова: пародонтит, пародонтальный дефект, направленная костная регенерация, направленная тканевая регенерация, пародонтальные мембраны, регенеративная пародонтальная хирургия

MODERN METHODS OF GUIDED BONE AND TISSUE REGENERATION IN THE SURGICAL TREATMENT OF PERIODONTAL DEFECTS

¹Konovalova E. V. ORCID ID 0000-0002-5020-6619,

¹Ivanov P. V. ORCID ID 0000-0002-4323-7943, ²Schetinin V. V.,

³Shastin E. N. ORCID ID 0009-0008-5660-9276, ¹Rybas A. R.

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: udaltsovakaterina@mail.ru;

²Limited Liability Company Center of Implantology and Aesthetic Medicine DENTORA, Russian Federation;

³Limited Liability Company BALDAR, Russian Federation

Periodontitis belongs to a group of chronic inflammatory diseases accompanied by the destruction of tooth-supporting tissues, including the root cementum, periodontal ligament, and alveolar bone. Without timely and rational treatment, this pathology becomes the leading cause of tooth loss in the adult population, which subsequently provokes the development of serious prosthetic and orthodontic problems. The aim of this review is to analyze modern methods of regenerative periodontal surgery, including guided bone regeneration (GBR) and guided tissue regeneration (GTR) in the surgical treatment of periodontal bone defects based on a review of available literature. Materials and methods: a narrative review of publications in the PubMed, Scopus, and e-Library databases was conducted. Articles published over the last 20 years were reviewed, with emphasis on studies from the past 10 years, using keywords in Russian and English: «periodontitis», «periodontal defect», «guided bone regeneration», «guided tissue regeneration», «periodontal membranes», «regenerative periodontal surgery». Results: Combined approaches, namely the use of barrier membranes in conjunction with bone grafts and biological factors according to a number of reviews and clinical studies, may provide more favorable outcomes for the regeneration of lost tissues. Asymmetric resorbable membranes and tissue engineering using periodontal ligament stem cells represent promising directions in the treatment of periodontal defects with complex morphology. Conclusion: Despite significant progress in surgical periodontology, achieving complete functional regeneration of the periodontium remains a challenging task requiring further research.

Keywords: periodontitis, periodontal defect, guided bone regeneration, guided tissue regeneration, periodontal membranes, regenerative periodontal surgery

Введение

Внутрикостные пародонтальные дефекты являются частым осложнением пародонтита. Оптимальным результатом их лечения считается отсутствие кровоточивости при зондировании, наличие неглубоких пародонтальных карманов (связанное с регенерацией пародонта, формированием нового цемента корня с функционально ориентированными волокнами периодонтальной связки, соединенными с альвеолярной костью), а также отсутствие рецессии мягких тканей [1]. Для достижения регенерации пародонта применяется множество различных хирургических методов, которые часто включают имплантацию костных трансплантатов и/или костнозамещающих материалов, деминерализацию поверхности корня, направленную тканевую регенерацию, использование факторов роста, белков эмалевой матрицы, а также различные их комбинации [2].

Цель настоящего обзора – систематизация и анализ современных методов регенеративной пародонтальной хирургии, включая направленную костную регенерацию (НКР) и направленную тканевую регенерацию (НТР), при лечении внутрикостных пародонтальных дефектов, с оценкой эффективности различных типов барьерных мембран, остеоматериалов и подходов тканевой инженерии в пародонтологии.

Материалы и методы исследования

Проведен аналитический обзор научной литературы за период с 2005 – 2026 гг. Дата последнего поиска: 15 мая 2026 г. Поиск осуществлялся в электронных базах PubMed, Scopus, e-Library. Изучались статьи за последние 20 лет с акцентом на работы последних 10 лет. Поиск осуществлялся по ключевым словам на русском и английском языках: «пародонтит», «пародонтальный дефект», «направленная костная регенерация», «направленная тканевая регенерация», «пародонтальные мембраны», «регенеративная пародонтальная хирургия», «periodontitis», «periodontal defect», «guided bone regeneration», «guided tissue regeneration», «periodontal membranes», «regenerative periodontal surgery». Первично было отобрано 168 публикаций. Критериями включения были оригинальные клинические исследования, систематические обзоры и мета-анализы, рандомизированные контролируемые исследования (РКИ), посвященные оценке эффективности методов направленной костной регенерации и направленной тканевой регенерации при хирургическом лечении костных пародонтальных дефектов. Критериями исключения были исследования, проведенные

на животных, описания клинических кейсов (за исключением описаний новых хирургических методик), публикации, не содержащие данных о клинических исходах. После удаления дубликатов (n=32), исключения публикаций на животных (n=31), клинических случаев без новых методик (n=24) и статей без данных о клинических исходах (n=46). В финальный обзор включено 35 источников, соответствующих теме и критериям включения.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно результатам систематического обзора А. Sculean с соавт., регенерация пародонта при внутрикостных дефектах может быть достигнута в различной степени при использовании ряда методов и материалов. Регенерация пародонта выявлена при применении различных костных трансплантатов и костнозамещающих материалов, методов направленной тканевой регенерации, биологических факторов, а также их комбинаций. По данным ряда обзоров и клинических исследований, наилучшие результаты могут обеспечиваться при использовании комбинированных подходов, тогда как применение только одного вида материала приводит к ограниченной регенерации пародонта либо к её отсутствию [3,4,5]. Так, сочетанное использование концентрированных факторов роста с кальций-фосфатным цементом, обладающим свойствами самоотверждения, значительно улучшило клинические и рентгенологические показатели при лечении внутрикостных пародонтальных дефектов [6].

Традиционные хирургические подходы, в частности открытый кюретаж, обладают ограниченным регенераторным потенциалом. В настоящее время в клинической практике разрабатываются, анализируются и внедряются хирургические методики, направленные на прогнозируемую регенерацию тканей пародонта. В литературе обсуждаются различные материалы и агенты, используемые для регенерации внутрикостных дефектов и дефектов фуркации, включая костнозамещающие трансплантаты, барьерные мембраны и биологические модификаторы [7,8].

Начиная с конца 1980-х годов ведется активная работа по ускорению и усилению регенерации тканей пародонта с использованием методов направленной тканевой регенерации (НТР), направленной костной регенерации (НКР) и других регенеративных подходов. Следует отметить, что направленная тканевая регенерация (НТР) направлена на восстановление всех тканей пародонтального комплекса, таких как: цемент, свя-

зочный аппарат, костная ткань, что достигается применением барьерных мембран. Направленная костная регенерация (НКР) фокусируется преимущественно на восполнении объемов костной ткани, часто в рамках подготовки к дентальной имплантации, либо при лечении глубоких внутрикостных пародонтальных дефектов. Эти достижения значительно улучшили клинические результаты лечения заболеваний пародонта. Достигнут большой прогресс в развитии клеточной терапии и тканевой инженерии. Применение принципов, методов и подходов тканевой инженерии в пародонтологии продемонстрировало высокий потенциал в регенерации тканей пародонтального комплекса: альвеолярной кости, периодонтальной связки, цемента корня и, в конечном итоге, восстановления нормальной структуры и функции пародонта вокруг ранее пораженного зуба [9,10]. Так, в рамках актуальной научной парадигмы тканевой инженерии и регенеративной медицины на первый план выходят биомиметические материалы. Данные материалы способны воспроизводить сложный комплекс биохимических и биофизических сигналов, характерных для нативного внеклеточного матрикса. Биомиметические материалы также демонстрируют механическую адаптивность (способность к динамическому ремоделированию), микроструктурную связанность, обеспечивающую интеграцию клеток и транспорт метаболитов, а также присущую им биологическую активность. Указанные свойства обуславливают высокий потенциал биомиметических материалов в качестве матрикса для создания живых имплантатов, в том числе в пародонтологии [11]. Разработаны биоматериалы с антимикробной, иммуномодулирующей и регенеративной активностью, что открывает новые перспективы в лечении инфекционных заболеваний бактериальной этиологии, в том числе пародонтита. Данные материалы могут быть внесены в пародонтальный дефект в виде микросфер, гелей, пленок, пептидов [12].

Существуют два наиболее распространенных метода регенерации: направленная тканевая регенерация (НТР) и направленная костная регенерация (НКР). Они направлены на восстановление поврежденных тканей пародонта и кости, пораженных вследствие пародонтита. В процессе лечения НТР/НКР барьерная мембрана размещается на границе между мягкой тканью и пародонтальным дефектом с целью предотвращения врастания мягких тканей и создания пространства для миграции медленно пролиферирующих остеогенных клеток в область дефекта. В последние годы асим-

метричные резорбируемые барьерные мембраны привлекают значительное внимание как новое поколение мембран для НТР/НКР. Несмотря на многочисленные публикации, посвященные асимметричным мембранам, до сих пор отсутствует всесторонний обзор, в котором подчеркивалась бы роль структуры мембраны в регенерации пародонта [13]. Барьерные мембраны обладают рядом свойств, которые могут быть модифицированы. Таким образом, актуальной задачей является обновление имеющихся данных о физико-химических и механических характеристиках мембран, а также о сопряженных с ними биологических исходах. Не менее значимым представляется анализ биологических механизмов, опосредующих остеорегенерацию в костных дефектах, закрытых барьерными мембранами. Согласно экспериментальным данным, вариации физико-химических и механических свойств мембран способны оказывать стимулирующее влияние на репаративный остеогенез. Кроме того, новые результаты указывают на то, что пространство, ограниченное мембраной, выполняет не только пассивную барьерную функцию, но и активно участвует в регенерации дефекта. В связи с этим ключевой стратегией является оптимизация мембран с позиций сочетания их барьерных и биоактивных свойств [14,15]. Принципы тканевой инженерии основаны на процессе объединения клеток, каркасов и сигнальных молекул для производства функциональных тканей с целью восстановления, поддержания и улучшения поврежденных органов. Открытие стволовых клеток периодонтальной связки подтвердило возможность разработки тканеинженерных терапевтических подходов для лечения заболеваний пародонта. Стволовые клетки периодонтальной связки являются разновидностью соматических стволовых клеток, которые демонстрируют способность к дифференцировке в несколько типов клеток и к надежному клональному самообновлению. В связи с этим они рассматриваются как весьма перспективное направление в регенеративной терапии пародонта [16,17]. Современные методы лечения способны ограничить прогрессирование заболевания, однако достижение истинной регенерации, характеризующейся перпендикулярно ориентированным прикреплением волокон периодонтальной связки к цементу на поверхности корня, остается сложной задачей. В связи с этим разработаны тканеинженерные подходы, направленные на улучшение регенерации за счет микроинженерных топографических особенностей, специально созданных для области пародонта [18].

Появление белков эмалевой матрицы и рекомбинантных факторов роста открыло новую эру, где биологические медиаторы могут использоваться для регенерации пародонта. Преимущество рекомбинантных факторов роста – стабильность их регенеративного потенциала; различия в результатах заживления или хирургическими погрешностями. В обзоре Као с соавт. рассматривается эволюция тканевой инженерии и её влияние на клиническое лечение пародонтальных и костных дефектов при подготовке к имплантации [19]. Рекомбинантный амелогенин может служить альтернативой белкам эмалевой матрицы, так как обладает про-регенеративным клеточным поведением, особенно в сигнальных путях, связанных с формированием минерализованных тканей. В исследованиях отмечалось усиление адгезии, миграции, дифференцировки, минерализации и повышение экспрессии остеогенных/цементогенных маркеров (щелочная фосфатаза, остеокальцин, костный сиалопротеин, RUNX2). Однако важно отметить, что в нескольких исследованиях сообщалось о нейтральных, смешанных или дозозависимых эффектах, особенно в отношении пролиферации и миграции клеток [20].

Направленная регенерация тканей пародонта предполагает хирургическую имплантацию природных или синтетических полимеров в форме мембран, гидрогелей или трехмерных матриц. Комбинации биоматериалов с биоактивными факторами представляют собой регенеративные стратегии нового поколения. Доставка клеток с использованием клеточно-каркасных конструкций показала эффективность при лечении пародонтита. В настоящее время для дополнения существующих методов регенерации пародонта предлагается биоинженерия тканей с применением генетически модифицированных стволовых клеток. Создание трехмерных структур с помощью аддитивных технологий (3D-печати) позволяет улучшить влияние архитектуры имплантата на процесс тканеобразования [21].

Костные дефекты в полости рта могут значительно варьироваться: от незначительных внутрикостных поражений, вызванных хроническим воспалением пародонта до обширных костных дефектов, которые распространяются через костную ткань челюсти в результате травмы, резекции опухоли или врожденных дефектов. Различия в размерах и локализации этих дефектов еще больше усугубляются индивидуальными особенностями пациента и факторами окружающей среды, которые способствуют проблемам регенерации пародонта, регенерации

периимплантатной ткани и реконструкции альвеолярного гребня. В обзорной работе Л. Ларссона, А.М. Деккера и соавторов «Regenerative Medicine for Periodontal and Peri-implant Diseases» систематизированы терапевтические стратегии и классы биоматериалов, применяемые при регенерации альвеолярной костной ткани [22]. Предложены новые биомиметические материалы и технологии изготовления каркасов (скаффолдов) для регенерации тканей пародонта. Особое внимание уделено недавней разработке многофункциональных каркасных биоматериалов, предназначенных для одновременной регенерации альвеолярной кости, периодонтальной связки и цемента корня [23]. При наличии пародонтальных дефектов сложной морфологии применяются разные типы каркасов, в том числе многослойные. Существуют многослойные каркасы, предназначенные для иерархически организованной регенерации альвеолярной кости, периодонтальной связки и цемента, однако, ни один из них до настоящего времени не способен воспроизвести все четыре типа тканей, вовлеченных в пародонтальный дефект [24]. Скаффолды, изготовленные методом 3D-печати с использованием мезенхимальных стволовых клеток и композитного биоразлагаемого каркаса показали свою эффективность при лечении внутрикостных пародонтальных дефектов сложной морфологии [25].

Регенерация пародонта остается актуальной клинической проблемой, так как для восстановления здоровья и функции зуба необходимо формирование правильного прикрепления и функционально ориентированной периодонтальной связки к регенерированной кости и цементу [26]. В исследовании Р. Стэйплса, С. Ивановски, К. Васвани и С. Вакетта «Melt electrowriting scaffolds with fibre-guiding features for periodontal attachment» представлен инновационный двухфазный каркас, созданный с использованием технологии расплавленной электростринговой печати (melt electrowriting) для направленного контроля роста тканей. В отличие от существующих аналогов, предложенный каркас обладает высокой пористостью, адаптируемостью и позволяет точно воспроизводить прикрепление волокон периодонтальной связки, как к поверхности корня зуба, так и к поверхности альвеолярной кости, что является критическим условием для достижения функциональной регенерации пародонта. Полученные результаты не только восполняют значительный пробел в области биоматериал-опосредованного управления тканевыми процессами, но и обещают более прогнози-

руемые клинические исходы, что представляет собой прогресс в данной области [27].

В хирургической пародонтологии модифицируются и совершенствуются не только регенеративные материалы, но и хирургические методики направленной костной регенерации. Одной из таких разработок является модифицированная малоинвазивная хирургическая техника (M-MIST), используемая при лечении внутрикостных пародонтальных дефектов. Данный хирургический метод был предложен в ответ на клиническую необходимость уменьшения размеров хирургического лоскута, сокращения сроков регенерации тканей, снижения дискомфорта для пациента и повышения стабильности послеоперационной раны. Метод продемонстрировал свою эффективность как при самостоятельном применении, так и в сочетании с производным эмалевой матрицы и ксеногенным остеозамещающим материалом. Динамика уровня клинического прикрепления между первым и десятым годами наблюдения во всех трёх группах оказалась минимальной (от -0,1 до -0,3 мм) и статистически незначимой как при внутригрупповом сравнении, так и между группами ($p > 0,05$) [28].

В хирургической пародонтологии эстетический компонент является решающим фактором при планировании лечебных мероприятий в области фронтальных зубов. В связи с этим приоритетное значение приобретает сохранение анатомической целостности десневого края и исходной высоты межзубных сосочков. Хирургическое лечение пародонтальных дефектов в эстетической зоне может расцениваться как удовлетворительное только в тех случаях, когда удастся избежать повреждения или рецессии десневого сосочка. Для минимизации осложнений и достижения оптимальных эстетических результатов разработаны различные типы хирургических лоскутов. К числу таковых относятся лоскуты с сохранением зубодесневого сосочка (papilla-preserving flaps), а также малоинвазивные хирургические подходы, которые предполагают либо минимальную отслойку межзубного сосочка, либо полный отказ от его приподнимания [29].

Разработаны техники с использованием определенного подхода к рассечению тканей при работе в изолированных внутрикостных пародонтальных дефектах. Так, при проведении НКР с использованием протокола «AICAST» описаны положительные клинические результаты: было зафиксировано уменьшение глубины ПК на $6,05 \pm 1,76$ мм ($p < 0,01$), уменьшение рецессии десны на $1,15 \pm 1,97$ мм ($p = 0,119$) и прирост клинического прикрепления на

$7,20 \pm 2,13$ мм ($p < 0,01$). Полное рентгенологическое замещение внутрикостного кармана наблюдалось во всех пародонтальных дефектах. Хирургическая методика «AICAST» представляет собой инновационный протокол оперативного вмешательства для лечения глубоких внутрикостных пародонтальных дефектов и возможного уменьшения, связанных с ними рецессий десны [30]. При использовании данной хирургической методики также зафиксировано статистическое уменьшение глубины пародонтального кармана, уменьшение значений рецессии десны.

Следует отметить, что эндоскопический поддесневой кюретаж (EASD), как и лоскутные пародонтологические операции с сохранением зубодесневого сосочка (PPFS) под увеличением, приобрели особую популярность благодаря своей эффективности. Ликвидация кармана достигнута в 100% (PPFS) и 87,5% (EASD) участков [31].

Для лечения внутрикостных пародонтальных дефектов был предложен модифицированный неинцизионный хирургический доступ с сохранением зубодесневых сосочков (M-NIPSA). В сериях клинических случаев описаны положительные результаты данного протокола: он позволяет сохранить межзубные сосочки за счёт расположения линий разрезов в стороне от межзубных контактов, что обеспечивает хорошие результаты. Однако следует отметить, что применение данной методики ограничено из-за морфологии и анатомии костного дефекта. Хирургический протокол «M-NIPSA» позволяет преодолеть анатомические ограничения традиционных методик направленной костной регенерации, обеспечивая первичное заживление при минимальном разрезе и отслойке лоскута. В сочетании с эффективными остеозамещающими материалами и факторами роста данный метод значительно улучшает исход хирургического вмешательства. Было отмечено статистически значимое уменьшение глубины пародонтального кармана, рентгенологическое восстановление костной ткани. В отдалённом послеоперационном периоде отмечено уменьшение осложнений, связанных с развитием рецессии десны [32]. Следует также отметить, что применение данного хирургического подхода в сочетании с рекомбинантным фактором роста фибробластов человека 2-го типа и депротенинизированным бычьим костным остеозамещающим материалом привело к улучшению клинических параметров и уменьшению костной резорбции при лечении внутрикостного дефекта в области центральных резцов у пациента с агрессивным типом пародонтита [33].

Хирургический протокол, сочетающий апикальный неинцизионный хирургический доступ с сохранением зубодесневых сосочков, используется не только при лечении пародонтальных дефектов, но и при лечении запущенного периимплантита с формированием дефектов с ограниченным количеством костных стенок и/или при наличии надкостных (супракрестальных) дефектов.

Хирургическое лечение пародонтальных внутрикостных дефектов часто сопровождается осложнениями в послеоперационном периоде, такими как рецессия десны. Для лечения пациентов с тонким или средним фенотипом десны и внутрикостным пародонтальным дефектом была предложена методика, сочетающая коронально перемещённый лоскут с сохранением всего сосочка (coronally advanced entire papilla preservation – CA-EPP), в сочетании с соединительнотканым трансплантатом (CTG). В представленных клинических случаях применение описанной хирургической методики способствовало выраженному улучшению клинического уровня межзубного прикрепления, а также позволило добиться полноценного закрытия пародонтального кармана без признаков рецессии десны в отдалённом послеоперационном периоде [34].

На сегодняшний день в области направленной регенерации тканей пародонта достигнуты значительные успехи. Однако процесс ремоделирования пародонта сопряжен со сложными изменениями микроокружения, и регенерация тканей пародонта по-прежнему остается труднодостижимой задачей [6,35].

При интерпретации результатов данного аналитического обзора, посвященного анализу современных методов регенеративной пародонтальной хирургии необходимо учитывать ряд ограничений. Во-первых, заметная доля сведений, особенно касающихся тканевой инженерии, основана на доклинических испытаниях либо ранних фазах клинических исследований, что не позволяет напрямую использовать полученные результаты в повседневной врачебной практике. Во-вторых, по многим новым оперативным техникам, таким как AICAST, NIPSA и CA-EPP, отсутствуют рандомизированные контролируемые исследования с длительным послеоперационным мониторингом. В-третьих, в большинстве проанализированных работ основным инструментом оценки регенерации являлись рентгенологические методы, которые широко применяются как клинический метод оценки костного заполнения дефекта, однако не позволяют достоверно судить о полноценной функциональной регенерации пародонта.

Для подтверждения подлинной функциональной регенерации пародонта требуются гистологические исследования, проведение которых у людей ограничено инвазивностью процедуры забора материала и этическими соображениями. В связи с этим значительная часть подобных исследований выполняется на животных моделях, что существенно затрудняет использование полученных данных в клинической практике. Неоднородность структуры исследований, различия в типах дефектов и применяемых материалах серьезно осложняют сопоставление результатов и выработку чётких клинических рекомендаций.

Заключение

Современные методы направленной костной регенерации, включая использование барьерных мембран, комбинации костных трансплантатов с биологическими факторами и матриксами на основе стволовых клеток, демонстрируют высокий потенциал в восстановлении тканей пародонта. Наибольшая эффективность достигается при комбинированных подходах. Однако функциональная регенерация с формированием правильно ориентированных волокон периодонтальной связки остаётся сложной задачей. Перспективными направлениями являются разработка многослойных скаффолдов с использованием технологий 3D-печати для индивидуального подхода к каждому клиническому случаю.

Список литературы

1. Вережкина Ю. В., Шаманова З. К., Царинская Н. М., Сирак С. В., Перикова М. Г., Еникеев А. М. Индексная оценка результатов лечения хронического пародонтита в условиях потери минеральной плотности костной ткани // Главные врач Юга России. 2023. № 3(89). С. 2-10. EDN: PEPBFZ.
2. Коновалова Е. В., Иванов П. В., Зюлькина Л. А., Шастин Е. Н. Рентгенологическая и функциональная оценка регенерации костной ткани после оперативного вмешательства на тканях пародонта // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2025. № 10-2. С. 106-109. DOI: 10.37882/2223-2966.2025.10-2.10. EDN: SIOKZE.
3. Sculean A., Nikolidakis D., Nikou G., Ivanovic A., Chapple I. L., Stavropoulos A. Biomaterials for promoting periodontal regeneration in human intrabony defects: a systematic review // Periodontology 2000. 2015. № 68(1). P. 182–216. DOI: 10.1111/prd.12086.
4. Calciolari E., Corbella S., Gkraniats N., Viganó M., Sculean A., Donos, N. Efficacy of biomaterials for lateral bone augmentation performed with guided bone regeneration. A network meta-analysis // Periodontology 2000. 2023. № 93(1). P. 77–106. DOI: 10.1111/prd.12531.
5. Аведова Д. Ю., Осипова Ю. Л., Зюлькина Л. А., Илюнина О. О. Оптимизация костной пластики у пациентов с атрофией челюстных костей // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 10-2. С. 128-130. DOI: 10.37882/2223-2966.2024.10-2.01. EDN: BAADEM.
6. Wang X., Cheng X., Zhang Y., Li F., Duan J., Qiao J. Therapeutic effect of concentrated growth factors combined with self-curing calcium phosphate cement on periodontal intrabony defects: Clinical and radiographic evaluation // Journal of Peking

- University. Health sciences. 2025. № 57(1). P. 42–50. DOI: 10.19723/j.issn.1671-167X.2025.01.007.
7. Wang H. L., Cooke J. Periodontal regeneration techniques for treatment of periodontal diseases // *Dental clinics of North America*. 2005. № 49(3). P. 637–VII. DOI: 10.1016/j.cden.2005.03.004.
8. Liu Y., Guo L., Li X., Liu S., Du J., Xu J., Hu J., Liu Y. Challenges and Tissue Engineering Strategies of Periodontal-Guided Tissue Regeneration // *Tissue engineering. Part C, Methods*. 2022. № 28(8). P. 405–419. DOI: 10.1089/ten.TEC.2022.0106.
9. Chen F. M. Zhonghua kou qiang yi xue za zhi. Zhonghua kouqiang yixue zazhi // *Chinese journal of stomatology*. 2024. № 59(4). P. 312–317. DOI: 10.3760/cma.j.cn112144-20240130-00050.
10. Ward E. A Review of Tissue Engineering for Periodontal Tissue Regeneration // *Journal of veterinary dentistry*. 2022. № 39(1). P. 49–62. DOI: 10.1177/08987564211065137.
11. Zhang Q., Gou C., Zhang, Z. Biomimetic materials: a promising strategy for periodontal tissue engineering and regeneration // *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2025. № 13. P. 1639170. DOI: 10.3389/fbioe.2025.1639170.
12. Wu H., Li Y., Shi L., Liu Y., Shen J. New Advances in Periodontal Functional Materials Based on Antibacterial, Anti-Inflammatory, and Tissue Regeneration Strategies // *Advanced healthcare materials*. 2025. № 14(9). P. e2403206. DOI: 10.1002/adhm.202403206.
13. Bee S. L., Hamid Z. A. A. Asymmetric resorbable-based dental barrier membrane for periodontal guided tissue regeneration and guided bone regeneration: A review // *Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials*. 2022. № 110(9). P. 2157–2182. DOI: 10.1002/jbm.b.35060.
14. Elgali I., Omar O., Dahlin C., Thomsen P. Guided bone regeneration: materials and biological mechanisms revisited // *European journal of oral sciences*. 2017. № 125(5). P. 315–337. DOI: 10.1111/eos.12364.
15. Ali M., Mohd Noor S. N. F., Mohamad H., Ullah F., Javed F., Abdul Hamid Z. A. Advances in guided bone regeneration membranes: a comprehensive review of materials and techniques // *Biomedical physics & engineering express*. 2024. № 10(3). P. 10.1088/2057-1976/ad1e75. DOI: 10.1088/2057-1976/ad1e75.
16. Tomokiyo A., Wada N., Maeda H. Periodontal Ligament Stem Cells: Regenerative Potency in Periodontium // *Stem cells and development*. 2019. № 28(15). P. 974–985. DOI: 10.1089/scd.2019.0031.
17. Zhang Z., Deng M., Hao M., Tang, J. Periodontal ligament stem cells in the periodontitis niche: inseparable interactions and mechanisms // *Journal of leukocyte biology*. 2021. № 110(3). P. 565–576. DOI: 10.1002/JLB.4MR0421-750R.
18. Staples R., Ivanovski S., Vaquette C. Fibre-guiding biphasic scaffold for perpendicular periodontal ligament attachment // *Acta biomaterialia*. 2022. № 150. P. 221–237. DOI: 10.1016/j.actbio.2022.07.023.
19. Kao R. T., Conte G., Nishimine D., Dault S. Tissue engineering for periodontal regeneration // *Journal of the California Dental Association*. 2005. № 33(3). P. 205–215. DOI: 10.1080/19424396.2005.12223862.
20. Luo J. D. D., Mardini J., Lee R., Dehghani F., Schindler A. Recombinant Amelogenin as a Potential Alternative to Enamel Matrix Derivatives in Periodontal Regeneration: A Scoping Review of Its Biological Activity, Synthesis and Delivery Systems // *Clinical and experimental dental research*. 2026. № 12(2). P. e70325. DOI: 10.1002/cre2.70325.
21. Seciu A. M., Craciunescu O., Stanciu A. M., Zarnescu O. Tailored Biomaterials for Therapeutic Strategies Applied in Periodontal Tissue Engineering // *Stem cells and development*. 2019. № 28(15). P. 963–973. DOI: 10.1089/scd.2019.0016.
22. Larsson L., Decker A. M., Nibali L., Pilipchuk S. P., Berglundh T., Giannobile W. V. Regenerative Medicine for Periodontal and Peri-implant Diseases // *Journal of dental research*. 2016. № 95(3). P. 255–266. DOI: 10.1177/0022034515618887.
23. Deng Y., Liang Y., Liu, X. Biomaterials for Periodontal Regeneration // *Dental clinics of North America*. 2022. № 66(4). P. 659–672. DOI: 10.1016/j.cden.2022.05.011.
24. Jahangirnezhad M., Mahmoudinezhad S. S., Moradi M., Moradi K., Rohani A., Tayebi L. Bone Scaffold Materials in Periodontal and Tooth-supporting Tissue Regeneration: A Review // *Current stem cell research & therapy*. 2024. № 19(4). P. 449–460. DOI: 10.2174/1574888X18666221227142055.
25. Baba S., Yamada Y., Komuro A., Yotsui Y., Umeda M., Shimuzutani K., Nakamura S. Phase I/II Trial of Autologous Bone Marrow Stem Cell Transplantation with a Three-Dimensional Woven-Fabric Scaffold for Periodontitis // *Stem cells international*. 2016. № 2016. P. 6205910. DOI: 10.1155/2016/6205910.
26. Коновалова Е. В., Иванов П. В., Зюлькина Л. А., Невылицын И. В. Клинико-рентгенологическая оценка эффективности хирургического лечения воспалительных заболеваний пародонта с использованием направленной тканевой регенерации // *Уральский медицинский журнал*. 2022. № 21(3). С. 38–45. DOI: 10.52420/2071-5943-2022-21-3-38-45.
27. Staples R., Ivanovski S., Vaswani K., Vaquette, C. Melt electrowriting scaffolds with fibre-guiding features for periodontal attachment // *Acta biomaterialia*. 2024. № 180. P. 337–357. DOI: 10.1016/j.actbio.2024.04.006.
28. Cortellini P., Cortellini S., Bonaccini D., Tonetti M. S. Modified minimally invasive surgical technique in human intrabony defects with or without regenerative materials-10-year follow-up of a randomized clinical trial: Tooth retention, periodontitis recurrence, and costs // *Journal of clinical periodontology*. 2022. № 49(6). P. 528–536. DOI: 10.1111/jcpe.13627.
29. Pragya G., Logaranjani A., Prashanthi P., Mahendra J. A review on papilla preservation flap techniques // *Bioinformation*. 2025. № 21(6). P. 1463–1466. DOI: 10.6026/973206300211463.
30. Calzavara D., Morante S., Sanz J., Noguero F., Gonzalez J., Romandini M., Sanz M. The apically incised coronally advanced surgical technique (AICAST) for periodontal regeneration in isolated defects: a case series // *Quintessence international*. Berlin, Germany: 1985. 2021. № 53(1). P. 24–34. DOI: 10.3290/j.qi.b1763645.
31. Ho K. D., Wang M., Ho K. R., Tong W. M., Tonetti M. S., Leung W. K. Papilla preservation flap surgery and endoscope-assisted subgingival debridement for Step 3 therapy: A 12-month pilot study on subgingival microbial community dynamics in deep periodontal pockets // *Journal of dentistry*. 2025. № 162. P. 106058. DOI: 10.1016/j.jdent.2025.106058.
32. Katayama A., Suzuki E., Rasperi G., Funato A. Modified nonincised papillae surgical approach: Minimally invasive technique for periodontal regeneration // *Clinical advances in periodontics*. 2026. № 16(1). P. 124–131. DOI: 10.1002/cap.10343.
33. Bizenjima T., Irokawa D., Yamada S., Saito A., Tomita S. A Case Report of Periodontal Regenerative Therapy Using Recombinant Human Fibroblast Growth Factor 2 and Deproteinized Bovine Bone Mineral with Non-incised Papillae Surgical Approach (NIPSA) for Angular Bone Defect in Patient with Stage III Grade C Periodontitis // *The Bulletin of Tokyo Dental College*. 2023. № 64(4). P. 145–155. DOI: 10.2209/tdpublication.2023-0011.
34. Rasperi G., Kazarian E., Aslan S. Coronally Advanced Entire Papilla Preservation (CA-EPP) Flap in the Treatment of an Isolated Intrabony Defect to Promote Buccal and Interproximal Soft Tissue Stability: Case Reports // *The International journal of periodontics & restorative dentistry*. 2024. № 44(1). P. 9–16. DOI: 10.11607/prd.6851.
35. Liu G., Xue J., Zhou X., Gui M., Xia R., Zhang Y., Cai Y., Li S., Shi S., Mao X., Chen Z. The paradigm shifts of periodontal regeneration strategy: From reparative manipulation to developmental engineering // *Bioactive materials*. 2025. № 49. P. 418–436. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2025.03.009.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ХРОНИЧЕСКИЙ БОЛЕВОЙ СИНДРОМ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ДИАГНОСТИКЕ И ЛЕЧЕНИЮ

Шибитова Д. В., Пекур И. А., Сайфуллина Ф. Р.,
Жанакулова Ж. М., Акболат Л.

*Некоммерческое акционерное общество «Карагандинский медицинский университет»,
Республика Казахстан, Караганда, e-mail: shibitovad@gmail.com*

Хронический болевой синдром в ортопедии и травматологии представляет собой одну из ведущих медико-социальных проблем, обусловленную высокой распространенностью заболеваний опорно-двигательного аппарата и их значительным вкладом в структуру временной и стойкой утраты трудоспособности. В статье рассмотрены основные причины формирования хронической боли, включая дегенеративно-дистрофические заболевания суставов и позвоночника, последствия травм и хирургических вмешательств, а также нейропатические расстройства. Особое внимание уделено механизмам хронизации боли, роли недостаточного и несвоевременного лечения, а также влиянию психосоциальных факторов на ее течение. Цель исследования – описание современных подходов к купированию хронической боли в травматологии и ортопедии, а также обозначение возможности их применения в клинической практике Казахстана. Проведен систематический обзор по методологии PRISMA. Поиск выполнен в базах PubMed, Scopus, Web of Science, Cochrane Library за 2020–2026 гг. Критерии включения: РКИ, систематические обзоры, когортные исследования по факторам риска, эпидемиологии, механизмам и лечению хронической боли. Из 487 первоначальных записей после скрининга и оценки качества (GRADE, RoB 2, Newcastle–Ottawa) отобрано 23 источника. Подчеркивается важность мультидисциплинарного подхода к лечению хронической боли с участием специалистов различного профиля. Особая роль отводится врачу-анестезиологу как ключевому звену в диагностике, выборе тактики лечения и координации комплексной терапии. Рассматриваются современные подходы к купированию болевого синдрома, включающие медикаментозные, интервенционные и нейромодуляционные методы. Большую роль играет необходимость раннего и комплексного вмешательства для предотвращения хронизации боли и повышения эффективности лечения пациентов травматолого-ортопедического профиля.

Ключевые слова: боль, хроническая боль, травматология, ортопедия, радиочастотная абляция, нестероидные противовоспалительные средства, опиоиды, мультидисциплинарный подход, неoadъюванты, блокада

CHRONIC PAIN SYNDROME: MODERN APPROACHES TO DIAGNOSIS AND TREATMENT

Shibitova D. V., Pekur I. A., Sayfullina F. R.,
Zhanakulova Zh. M., Akbolat L.

*Non-Profit Joint Stock Company “Karaganda Medical University”,
Karaganda, Republic of Kazakhstan, e-mail: shibitovad@gmail.com*

Chronic pain syndrome in orthopedics and traumatology represents one of the leading medical and social problems due to the high prevalence of musculoskeletal disorders and their significant contribution to temporary and permanent disability. The article examines the main causes of chronic pain formation, including degenerative-dystrophic diseases of the joints and spine, consequences of injuries and surgical interventions, as well as neuropathic disorders. Particular attention is paid to the mechanisms of pain chronicity, the role of insufficient and untimely treatment, and the influence of psychosocial factors on its course. The issue of studying is to describe modern approaches to the management of chronic pain in traumatology and orthopedics, as well as to outline the possibilities of their application in clinical practice in Kazakhstan. A systematic review was conducted following PRISMA methodology. The search was performed in PubMed, Scopus, Web of Science, and Cochrane Library from 2020 to 2026. Inclusion criteria: RCTs, systematic reviews, and cohort studies on risk factors, epidemiology, mechanisms, and treatment of chronic pain. From 487 initial records, after screening and quality assessment (GRADE, RoB 2, Newcastle–Ottawa), 23 sources were selected. The importance of a multidisciplinary approach to the treatment of chronic pain involving specialists from various fields is emphasized. A special role is assigned to the anesthesiologist as a key figure in diagnosing the source of pain, selecting optimal treatment strategies, and coordinating comprehensive therapy. Modern approaches to pain management are discussed, including pharmacological, interventional, and neuromodulation techniques. Early and comprehensive intervention is highlighted as essential for preventing pain chronicity and improving treatment outcomes in patients with orthopedic and trauma-related conditions.

Keywords: pain, chronic pain, traumatology, orthopedics, radiofrequency ablation, nonsteroidal anti-inflammatory drugs, opioids, adjuvants, nerve block, multidisciplinary approach

Введение

Хронический болевой синдром в ортопедии и травматологии остается одной из наиболее значимых проблем современной медицины. По данным эпидемиологических исследований, заболевания опорно-двигательного аппарата занимают ведущее место среди причин временной и стойкой утраты трудоспособности. Особую актуальность проблема приобретает у пациентов травматолого-ортопедического профиля, значительную часть которых составляют лица трудоспособного возраста, сталкивающиеся с последствиями производственных и спортивных травм, перегрузок и послеоперационных осложнений, особенно среди профессий, связанных с физическими нагрузками или длительным статическим положением тела [1].

Хроническая боль имеет выраженные социально-экономические последствия, включая прямые расходы на лечение и реабилитацию, а также косвенные потери, связанные со снижением производительности труда, преждевременным выходом на пенсию и инвалидизацией пациентов. В связи с этим эффективное лечение хронической боли является важной медицинской и социальной задачей [2]. Современный подход к лечению хронического болевого синдрома предполагает участие мультидисциплинарной команды, что является клинически эффективным, экономически выгодным и может быть более эффективным по сравнению с другими подходами. Одним из главных специалистов в таких многопрофильных командах выступает анестезиолог-реаниматолог, вовлеченный в ведение пациентов с хронической болью как на стационарном, так и на амбулаторном этапах.

Цель исследования – описать современные подходы к купированию хронической боли в травматологии и ортопедии и обозначить возможности их применения в клинической практике Казахстана.

Материалы и методы исследования

Тип исследования – обзор литературы. Дата проведения исследования: сентябрь 2025 г. Поиск исследований проводился в трех электронных базах данных (PubMed, Web of Science, Google Scholar), включенных в период с 2022 по 2025 г. Материалами исследования служили статьи, найденные по следующим ключевым словам: chronic pain, chronic pain AND orthopedics, chronic pain AND therapy, chronic pain AND radiofrequency ablation, chronic pain AND nerve block.

Результаты исследования и их обсуждение

Статистика и распространенность

Согласно международным исследованиям, хронический болевой синдром наблюдается у 20 % взрослого населения в мире. При этом заболевания опорно-двигательного аппарата занимают лидирующие позиции среди причин боли, длящейся более трех месяцев. С возрастом распространенность хронической боли увеличивается, так как имеют место естественные дегенеративные изменения опорно-двигательного аппарата [1].

В Казахстане, по данным Министерства здравоохранения и профильных исследовательских центров, заболевания костно-мышечной системы входят в число ведущих причин временной и стойкой нетрудоспособности. На конец 2025 г. численность проживающих лиц с инвалидностью с нарушением опорно-двигательного аппарата составила 4845 чел. [2].

Особенно высока распространенность остеоартрита, хронических болей в спине и посттравматических осложнений. В последние годы отмечается тенденция к увеличению числа пациентов, обращающихся за помощью по поводу хронической боли, что связано как с улучшением диагностики, так и с общим старением населения [3].

Определение боли

Согласно пересмотренному (2020 г.) определению Международной ассоциации по изучению боли (IASP), боль – это неприятное сенсорное и эмоциональное переживание, связанное с действительным или возможным повреждением тканей или описываемое в терминах такого повреждения [4]. Это современное толкование подчеркивает, что боль является сложным биопсихосоциальным феноменом, включающим не только физиологические, но и эмоционально-когнитивные компоненты, а также включает замечание о том, что боль может существовать без очевидного повреждения тканей.

Патогенез

Ощущение боли возникает при активации ноцицепторов в ответ на повреждение тканей или воспалительный процесс. При этом высвобождаются медиаторы воспаления (простагландины, брадикинин, гистамин, серотонин, цитокины), которые снижают порог возбуждения ноцицепторов и усиливают передачу болевых импульсов, что приводит к формированию периферической сенситизации. Болевые импульсы передаются по афферентным волокнам А-δ и С-типов в задние рога спинного мозга,

где формируется центральная сенситизация. При длительной стимуляции усиливается передача возбуждения через NMDA-рецепторы, увеличивается выделение глутамата и активируются клетки глии, что приводит к развитию гипералгезии и аллодинии и формированию хронической боли.[5].

Важную роль играет также нарушение нисходящих антиноцицептивных механизмов, включающих структуры ствола мозга. В зависимости от механизма формирования выделяют ноцицептивную, нейропатическую и ноципластическую боль, которые часто сочетаются у пациентов травматолого-ортопедического профиля. Понимание данных механизмов имеет принципиальное значение для выбора методов лечения и обоснования мультимодального подхода [5].

Фармакологические методы лечения хронической боли

НПВС. В травматологии и ортопедии хронический болевой синдром по большей части состоит из ноцицептивного компонента, так как основной источник боли – это воспалительная реакция в суставах, сухожилиях, костях или постоперационной области, сопровождающаяся выделением простагландинов, тромбоксанов, простациклинов.

Наиболее частым и оптимальным для большинства пациентов является назначение НПВС, поскольку в основе их противовоспалительного и анальгетического эффекта лежит именно блокада ЦОГ-2. Условно их можно подразделить на неселективные и селективные ингибиторы ЦОГ.

Неселективные ингибиторы ЦОГ (диклофенак, ибупрофен, кеторолак), подавляя обе изоформы, конечно, обеспечивают анальгезирующий эффект, но гораздо чаще дают гастроинтестинальные осложнения [6]. Частично селективные ингибиторы (мелоксикам, нимесулид) преимущественно блокируют ЦОГ-2, несколько реже вызывая язвенные процессы или диспепсию при длительном применении [6]. Высокоселективные ингибиторы ЦОГ-2 (целекоксиб, эторикоксиб) практически не влияют на ЦОГ-1 и характеризуются лучшей гастроинтестинальной переносимостью, но при этом, согласно некоторым исследованиям, могут смещать баланс между простациклином и тромбоксаном, увеличивая риск возникновения тромботических осложнений, таких как инфаркт миокарда или инсульт [7].

В Республике Казахстан, согласно действующим клиническим протоколам по травматологии и ортопедии, утвержденным Министерством здравоохранения, для купирования болевого синдрома используются обе группы НПВС [8].

Такие препараты, как диклофенак натрия, кетопрофен, кеторолак, наиболее часто используются при выраженном болевом синдроме, особенно в раннем послеоперационном периоде; мелоксикам – при хронически устойчивых болях опорно-двигательной системы; целекоксиб – если имеется необходимость длительного приема у пациентов с повышенным риском гастроинтестинальных осложнений.

Главное преимущество НПВС и особенно селективных ингибиторов заключается в том, что их можно применять длительно при хронических заболеваниях – остеоартрите, остеоартрозе, анкилозирующем спондилите и т. д. – они не вызывают зависимости, не оказывают влияния на сознание, не угнетают дыхание. Но тем не менее их использование достаточно часто связано с риском осложнений. Наиболее частыми являются поражения желудочно-кишечного тракта, включая гастрит, язвы и желудочно-кишечные кровотечения, обусловленные ингибированием ЦОГ-1 и снижением синтеза защитных простагландинов. НПВС также могут вызывать нефротоксичность – снижение клубочковой фильтрации, задержку жидкости и электролитные нарушения, особенно у пациентов с факторами риска. Со стороны сердечно-сосудистой системы отмечается увеличение риска артериальной гипертензии, тромботических осложнений и декомпенсации сердечной недостаточности, особенно при применении селективных ингибиторов ЦОГ-2. Реже наблюдаются аллергические реакции, бронхоспазм и гепатотоксичность.

Опиоиды. Наряду с НПВС, в травматологии и ортопедии применяются и опиоидные анальгетики, особенно при выраженном болевом синдроме или недостаточной эффективности базовой терапии.

Механизм их действия заключается во влиянии на центральные механизмы боли – они связываются с опиоидными рецепторами (μ , κ , δ), которые располагаются в структурах спинного и головного мозга, а также на периферических нервных окончаниях. В основном анальгетическое действие реализуется благодаря μ -рецепторам, стимуляция которых приводит к торможению проведения болевых импульсов по афферентным путям спинного мозга, что обеспечивает снижение их восприятия в коре головного мозга. В отличие от НПВС, они не устраняют воспаление, при этом эффективно подавляют восприятие боли [9].

В травматологии и ортопедии опиоиды применяются ограниченно и только строго по показаниям – при сильном болевом синдроме, не купируемом другими препа-

ратами. Их основное назначение: ранний послеоперационный период после крупных реконструктивных и эндопротезирующих операций (например, тотального эндопротезирования тазобедренного или коленного сустава, остеосинтеза при множественных переломах); посттравматическая боль высокой интенсивности, не поддающаяся лечению НПВС; комбинация с регионарной анестезией в рамках мультимодальной анальгезии; онкоортопедическая патология, сопровождающаяся хроническим болевым синдромом.

Зачастую опиоиды назначаются временно, с последующим по возможности переходом на НПВС. Несмотря на достаточно широкое применение, эффективность их при хроническом болевом синдроме травматолого-ортопедического профиля ограничена, так как имеет место развивающаяся толерантность и зависимость, а воспалительный компонент, являющийся ключевым патогенетическим механизмом, остается без коррекции. Поэтому гораздо лучше рассмотреть их как временный элемент мультимодальной анальгезии.

Адьювантные препараты: антидепрессанты, антиконвульсанты. Помимо воспалительного компонента, в хроническом болевом синдроме особое внимание стоит уделить и нейропатическому механизму: повреждение периферических нервов при травмах, оперативных вмешательствах, дегенеративных изменениях позвоночника приводит к перестройке болевого компонента и формированию центральной сенситизации – состоянию, при котором даже слабые стимулы вызывают боль. В таком случае привычные анальгетики оказываются недостаточно эффективными, так как не влияют на патологическую активность нейронов. Для коррекции таких механизмов применяются адьювантные препараты – антидепрессант и антиконвульсанты, регулирующие центральные звенья боли.

Селективные ингибиторы обратного захвата серотонина (СИОЗС) повышают концентрацию серотонина в синаптической щели за счет блокирования его обратного захвата пресинаптическими нейронами. Увеличение уровня серотонина усиливает активность нисходящих тормозных путей, исходящих из ствола мозга (ядра шва), которые подавляют передачу болевых импульсов на уровне спинного мозга. Таким образом, СИОЗС уменьшают центральную сенситизацию, снижают гипералгезию и уменьшают интенсивность хронической боли, особенно у пациентов с выраженным эмоциональным компонентом, тревогой или нарушением модуляции боли [10].

В ортопедической практике данная группа препаратов эффективна при хронической боли в спине, постламинэктомическом синдроме, болях при остеохондрозе с корешковыми симптомами, фантомных болях после ампутаций.

Антиконвульсанты, или противоэpileптические препараты, такие как габапентин, прегабалин, карбамазепин, снижают гипервозбудимость нейронов, участвующих в передаче боли. Блокируя кальциевые каналы в нейронах спинного мозга, они уменьшают высвобождение возбуждающих нейромедиаторов (глутамата, субстанции р). Как результат – снижение интенсивности нейропатической боли и уменьшение центральной сенситизации [11].

В ортопедии антиконвульсанты назначаются при посттравматических болях с неврологическим компонентом (сдавление нервных корешков, повреждение нервных стволов); постоперационных нейропатических болях (например, после эндопротезирования или остеосинтеза); радикулопатиях при дегенеративных заболеваниях позвоночника.

Назначение антидепрессантов и антиконвульсантов при хронических ортопедических болях имеет и ряд ограничений. Их эффективность выражена не у всех пациентов, особенно при преобладании ноцицептивного компонента боли. Препараты этих групп могут вызывать побочные эффекты – сонливость, головокружение, когнитивное снижение, прибавку веса, а для СИОЗС также характерны желудочно-кишечные нарушения и повышение риска кровотечений при сочетании с НПВС. Антиконвульсанты могут вызывать отечность и нарушать координацию, что затрудняет реабилитацию. Дополнительную проблему составляют лекарственные взаимодействия, седативный эффект и необходимость длительного приема, поскольку анальгетическое действие развивается постепенно. Это ограничивает их использование у пожилых пациентов и требует осторожности при подборе дозировок и комбинаций.

Физиотерапия, лечебная физкультура и реабилитация

Модификация образа жизни и регулярная физическая активность являются ключевыми компонентами комплексного лечения хронической боли. Во время физических упражнений активизируется антиноцицептивная система с высвобождением эндорфинов, энкефалинов, дофамина и серотонина, что обуславливает анальгетический эффект и улучшение психоэмоционального состояния. Кроме того, физическая активность влияет на гипоталамо-гипофизарно-

надпочечниковую систему, снижая уровень кортизола, нормализуя циркадные ритмы и улучшая сон, что повышает эффективность других методов лечения и приверженность пациентов [12].

Лечебная физкультура, физиотерапевтические упражнения и программы реабилитации способствуют укреплению мышечного корсета, улучшению подвижности и стабилизации суставов, повышению переносимости нагрузок и снижению интенсивности боли. Регулярные упражнения уменьшают периферическую сенситизацию за счет улучшения микроциркуляции, снижения воспаления, отека и мышечного спазма, что приводит к уменьшению афферентного болевого потока. Восстановление физиологических двигательных паттернов снижает перегрузку опорно-двигательного аппарата и предотвращает повторную стимуляцию ноцицепторов. Дополнительно физическая активность влияет на центральные механизмы боли, усиливая нисходящие антиноцицептивные пути и уменьшая центральную сенситизацию [13].

Психотерапия:

когнитивно-поведенческая терапия (КПТ)

Хроническая боль рассматривается как биопсихосоциальный феномен, при котором неблагоприятным предиктором хронизации является неадаптивное болевое поведение. В связи с этим важным компонентом лечения выступает когнитивно-поведенческая терапия (КПТ), направленная на коррекцию когнитивных, эмоциональных и поведенческих реакций на боль, включая снижение катастрофизации, тревожности, избегания активности и улучшение сна и качества жизни. При ноципластической и смешанной боли активируются центральные структуры мозга (таламус, лимбическая система, кора), формируется «болевая память», усиливается дистресс и страх боли, что способствует хронизации. КПТ способствует снижению центральной сенситизации и разрыву патологического цикла «боль – страх – напряжение – боль» [14]. Кроме того, КПТ повышает мотивацию к физической активности и реабилитации, усиливая эффективность мультимодального подхода. Психологические вмешательства уменьшают интенсивность боли, улучшают функциональное состояние и эмоциональное благополучие пациентов, особенно при сочетании с физиотерапией. Преимуществами метода являются неинвазивность, безопасность и возможность применения в амбулаторных условиях, включая индивидуальные, групповые и онлайн-форматы, что способствует повышению ком-

плаентности, улучшению сна и качества жизни пациентов с хронической болью [15].

Нейромодуляция:

TENS и магнитотерапия (PEMF)

Transcutaneous Electric Nerve Stimulation (TENS) – метод чрескожной электростимуляции, основанный на подаче электрических импульсов через кожу с целью уменьшения боли. Механизм действия связан со стимуляцией А-δ- и С-волокон, активацией сегментарных и нисходящих антиноцицептивных путей и снижением передачи болевых импульсов в задних рогах спинного мозга. TENS способствует уменьшению периферической сенситизации за счет снижения высвобождения медиаторов воспаления и активации эндогенных опиоидных механизмов. Наиболее выраженный и длительный анальгетический эффект наблюдается при низкочастотной стимуляции (LF-TENS <10 Гц) [16].

Pulsed Electromagnetic Field Therapy (PEMF) – метод воздействия импульсными электромагнитными полями, применяется при дегенеративных и воспалительных заболеваниях опорно-двигательного аппарата. Терапия импульсными электромагнитными полями (PEMF) способствует снижению выраженности боли и скованности, а также улучшению функционального состояния пациентов с остеоартрозом по сравнению с другими консервативными методами лечения [17].

В проведенных клинических исследованиях острых нежелательных явлений не зарегистрировано. Однако долгосрочные эффекты PEMF до настоящего времени не изучались, что не позволяет полностью исключить отсроченные риски. Качество доказательств терапевтической эффективности PEMF остается низким, и для рутинного клинического применения необходимы дополнительные высококачественные исследования. Таким образом, хотя PEMF считается безопасной в краткосрочной перспективе, ее долгосрочная безопасность окончательно не установлена [17].

Интервенционные методы

купирования болевого синдрома

В последние годы активно развиваются интервенционные методы лечения хронической боли – использование блокад, спинальная и эпидуральная анестезии, радиочастотная абляция, внутрисуставные инъекции и т. д.

Блокады периферических нервов используются для избирательного блокирования передачи ноцицептивных сигналов от определенной анатомической области

и применяются как для интраоперационного обезболивания, так и послеоперационного. Технически выделяют однократные (single-shot) блокады и непрерывные (катетерные). Однократные блокады выполняются врачом-анестезиологом под ультразвуковым контролем или при помощи нервного стимулятора для подтверждения близости нерва. Непрерывная периферическая блокада позволяет продлить анальгезию значительно дольше и обеспечить лучшее послеоперационное обезболивание, а также снизить потребности в опиоидах. Обзор данных показывает, что по сравнению с однократной блокадой непрерывная связана с лучшим контролем боли и меньшим опиоидным потреблением и, как следствие, уменьшением их побочных эффектов; возможностью амбулаторного ведения пациентов. Основные ограничения связаны с необходимостью повышенного мониторинга, поскольку существует небольшой риск катетерной миграции, утечки местного анестетика, возникновения инфекционного процесса [18].

Радиочастотная абляция (РЧА) – минимально инвазивный интервенционный метод лечения хронической боли, основанный на контролируемом термическом воздействии на нервные структуры с целью прерывания ноцицептивной передачи. Радиочастотное поле вызывает нагрев тканей до 60–90 °С, что приводит к селективному повреждению болевых афферентов и обеспечивает длительное снижение боли при минимальном влиянии на моторные функции [19].

В травматологии и ортопедии РЧА применяется при остеоартрозе крупных суставов, фасеточном синдроме позвоночника, постоперационном и посттравматическом болевом синдроме, а также при нейропатической боли. Метод показан пациентам при недостаточной эффективности консервативной терапии или наличии противопоказаний к повторным хирургическим вмешательствам. По данным метаанализов, радиочастотная абляция ганглионарных нервов при гонартрозе снижает интенсивность боли на 50–70 % в течение 3–6 месяцев и улучшает функциональные показатели [20].

К преимуществам РЧА относятся минимальная инвазивность, амбулаторное выполнение, низкий риск осложнений и отсутствие системных побочных эффектов. Ограничениями являются вариабельность длительности эффекта (3–12 месяцев), необходимость точной визуализации и высокая стоимость оборудования. Возможные осложнения включают кратковременную гипестезию и локальную болезненность в области вмешательства.

Внутрисуставные инъекции

Внутрисуставные инъекции включают применение глюкокортикостероидов, препаратов гиалуроновой кислоты и биологических методов, включая плазмотерапию (PRP). Применение глюкокортикостероидов имеет доказанную эффективность в краткосрочном снижении боли и воспаления, однако длительное использование ограничено потенциальными побочными эффектами. Препараты гиалуроновой кислоты представляются более безопасными, улучшающими упруго-эластические свойства хряща, поэтому широко используются при дегенеративных заболеваниях суставов, в частности при остеоартрозе. Несмотря на умеренную доказательную базу, данные методы включены в ряд клинических рекомендаций и рассматриваются как важный компонент комплексной терапии. При этом результаты исследований остаются неоднородными, что требует дальнейшего уточнения показаний и оценки долгосрочной эффективности [21]. Плазмотерапия (PRP) представляет собой перспективное направление биологической терапии, направленное на стимуляцию регенеративных процессов. Однако существующие данные характеризуются вариабельностью результатов, различиями в методологии исследований и отсутствием стандартизированных протоколов. В связи с этим применение PRP требует дальнейших рандомизированных исследований для определения оптимальных показаний и оценки эффективности [22].

Внутрисуставные инъекции должны выполняться с соблюдением строгих правил асептики. Для повышения точности введения препарата и снижения риска осложнений рекомендуется использование ультразвукового или рентгенологического наведения. Объем вводимого препарата и его концентрация зависят от конкретного сустава и применяемого лекарственного средства. К противопоказаниям относятся активный инфекционный процесс, системные воспалительные заболевания в фазе обострения, а также наличие аллергических реакций на компоненты вводимого препарата.

Современные представления о хронической боли в травматологии и ортопедии претерпели существенные изменения. Если ранее акцент делался преимущественно на фармакотерапию и отдельные интервенционные вмешательства, то в настоящее время ведущим является мультимодальный и поэтапный подход, сочетающий немедикаментозные, фармакологические и интервенционные методы лечения [23].

Согласно современным клиническим рекомендациям, базис терапии хрониче-

ской боли составляют немедикаментозные методы, направленные на восстановление функции, снижение сенситизации и улучшение качества жизни. К ним относятся лечебная физкультура, реабилитация, физиотерапия, когнитивно-поведенческая терапия и методы нейромодуляции. Их эффективность обусловлена воздействием как на периферические, так и на центральные механизмы формирования и хронизации боли, что делает их основой долгосрочного ведения пациентов [24].

В то же время у значительной части пациентов хроническая боль имеет смешанный характер с участием ноцицептивных, нейропатических и ноципластических механизмов, что ограничивает возможности консервативной терапии. В таких случаях требуется переход к более специализированным стратегиям, включая интервенционные методы лечения, направленные на прерывание патологической ноцицептивной передачи и снижение сенситизации.

На этом этапе ключевую роль играет анестезиолог как специалист по лечению боли, обладающий компетенциями в области регионарных и интервенционных технологий. Блокады, радиочастотная абляция, внутрисуставные инъекции и методы нейромодуляции позволяют целенаправленно воздействовать на патофизиологические механизмы боли, повышая эффективность терапии и улучшая функциональные исходы пациентов [25].

В последние годы в Казахстане постепенно развивается направление pain management и специализированной помощи пациентам с хронической болью. В крупных городах Республики Казахстан функционируют специализированные центры лечения боли, использующие интервенционные методы, включая лечебные блокады, радиочастотную абляцию, методы нейромодуляции и программы реабилитации. Это свидетельствует о практической реализуемости современных мультимодальных подходов в условиях национальной системы здравоохранения и подтверждает актуальность дальнейшего развития мультидисциплинарных клиник боли.

Ограничения исследования. Следует учитывать, что хронический болевой синдром в травматологии и ортопедии является клинически и патофизиологически неоднородным состоянием. В обзор были включены исследования, посвященные различным видам хронической боли, включая дегенеративные заболевания суставов, хроническую боль в спине, посттравматический и послеоперационный болевой синдром, что ограничивает возможность прямого сопоставления результатов.

Механизмы формирования боли при различных ортопедических состояниях существенно отличаются. При остеоартрозе преобладают воспалительные и дегенеративные процессы с ноцицептивным компонентом, тогда как при хронической боли в спине и послеоперационных состояниях значительную роль могут играть нейропатические и ноципластические механизмы, центральная сенситизация и психоэмоциональные факторы [26]. В связи с этим эффективность фармакологических, реабилитационных и интервенционных методов может различаться в зависимости от клинической ситуации и преобладающего механизма боли.

Кроме того, представленные в литературе исследования характеризуются неоднородностью дизайна, различиями в критериях включения пациентов, длительности наблюдения и используемых методах оценки боли и функциональных исходов. Это ограничивает возможность универсализации результатов и подчеркивает необходимость дальнейших рандомизированных исследований с более четкой стратификацией пациентов по типу хронической боли и механизмам ее формирования.

Заключение

Хронический болевой синдром в травматологии и ортопедии является многофакторным состоянием, требующим индивидуализированного и мультимодального подхода к лечению. Анализ современной литературы показывает эффективность сочетания немедикаментозных, фармакологических и интервенционных методов, направленных на снижение сенситизации, улучшение функционального состояния и качества жизни пациентов.

Полученные данные подтверждают важную роль анестезиолога-реаниматолога в системе мультимодального лечения хронической боли, особенно в рамках регионарных и интервенционных методов обезболивания.

Несмотря на достигнутый прогресс, сохраняется необходимость дальнейших исследований, направленных на уточнение показаний и долгосрочной эффективности различных методов лечения хронической боли.

Список литературы

1. Alkassabi O., Voogt L., Andrews P., Alhowimel A., Nijs J., Alsobayel H. Risk factors to persistent pain following musculoskeletal injuries: a systematic literature review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Is. 15. P. 9318. DOI: 10.3390/ijerph19159318.
2. Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. Организации по предоставлению специальных социальных услуг за 2025 год. [Электронный ресурс]. URL:

<https://stat.gov.kz/ru/industries/social-statistics/stat-medicine/publications/479797/> (дата обращения: 07.05.2026).

3. Yessirkepov M., Bekarysova D., Mutalipova G., Narkabulov A. Trends in the incidence of musculoskeletal diseases in Kazakhstan in 2011–2020: an information-analytical study // *Rheumatology International*. 2023. Vol. 43. Is. 8. P. 1541–1545. DOI: 10.1007/s00296-023-05343-0.

4. International Association for the Study of Pain (IASP) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iasp-pain.org> (дата обращения: 20.03.2026).

5. Li Z., Li X., Liu J., Sun R., Ye Y., Xiang H., Luo F., Li S., Luo A. Molecular Mechanisms of Chronic Pain and Therapeutic Interventions // *MedComm*. 2025. Vol. 6. Is. 8. P. e70325. DOI: 10.1002/mco2.70325.

6. Ribeiro H., Rodrigues I., Napoleão L., Lira L., Marques D., Veríssimo M., Andrade J. P., Dourado M. Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs), pain and aging: Adjusting prescription to patient features // *Biomedicine & pharmacotherapy*. 2022. Vol. 150. P. 112958. DOI: 10.1016/j.biopha.2022.112958.

7. Domper Arnal M. J., Hijos-Mallada G., Lanás A. Gastrointestinal and cardiovascular adverse events associated with NSAIDs // *Expert opinion on drug safety*. 2022. Vol. 21. Is. 3. P. 373–384. DOI: 10.1080/14740338.2021.1965988.

8. Остеоартроз (остеоартрит): клинический протокол диагностики и лечения / Министерство здравоохранения Республики Казахстан. Объединенная комиссия по качеству медицинских услуг. 2022. URL: <https://diseases.medelement.com/disease/%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BE%D0%B0%D1%80%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B7-%D0%BA%D1%80-%D1%80%D0%BA-2022/18450> (дата обращения: 23.06.2026).

9. Che T., Roth B. L. Molecular basis of opioid receptor signaling // *Cell*. 2023. Vol. 186. Is. 24. P. 5203–5219. DOI: 10.1016/j.cell.2023.10.029.

10. Heijmans L., Mons M. R., Joosten E. A. A systematic review on descending serotonergic projections and modulation of spinal nociception in chronic neuropathic pain and after spinal cord stimulation // *Molecular pain*. 2021. Vol. 17. P. 17448069211043965. DOI: 10.1177/17448069211043965.

11. Basilici Zannetti E., D'Angelo D., Cittadini N., Celi M., Pennini A., Rocco G., Vellone E., Alvaro R., Tarantino U. Development and Testing of the Quality of Life Osteoporosis Scale-Nonvertebral Fractures (QoLOS-NVFX) // *Orthopedic nursing*. 2021. Vol. 40. Is. 1. P. 33–41. DOI: 10.1097/NOR.0000000000000728.

12. Núñez-Cortés R., Salazar-Méndez J., Nijs J. Physical Activity as a Central Pillar of Lifestyle Modification in the Management of Chronic Musculoskeletal Pain: A Narrative Review // *Journal of functional morphology and kinesiology*. 2025. Vol. 10. Is. 2. P. 183. DOI: 10.3390/jfkm10020183.

13. Gibbs L., Kombluh M., Marinkovic K., Bell S., Ozer E. J. Using Technology to Scale up Youth-Led Participatory Action Research: A Systematic Review // *The Journal of adolescent health: official publication of the Society for Adolescent Medicine*. 2020. Vol. 67. Is. 2S. P. S14–S23. DOI: 10.1016/j.jadohealth.2019.10.019.

14. Ashar Y. K., Gordon A., Schubiner H., Uipi C., Knight K., Anderson Z., Carlisle J., Polisky L., Geuter S., Flood T. F., Kragel P. A., Dimidjian S., Lumley M. A., Wager T. D. Effect of Pain Reprocessing Therapy vs Placebo and Usual Care for Patients With Chronic Back Pain: A Randomized Clinical Trial // *JAMA Psychiatry*. 2022. Vol. 79. Is. 1. P. 13–23. DOI: 10.1001/jamapsychiatry.2021.2669.

15. Ho E. K., Chen L., Simic M., Ashton-James C. E., Comachio J., Wang D. X. M., Hayden J. A., Ferreira M. L., Ferreira P. H. Psychological interventions for chronic, non-specific low back pain: systematic review with network meta-analysis // *BMJ*. 2022. Vol. 376. P. e067718. DOI: 10.1136/bmj-2021-067718.

16. Johnson M. I., Paley C. A., Jones G., Mulvey M. R., Wittkopf P. G. Efficacy and safety of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) for acute and chronic pain in adults: a systematic review and meta-analysis of 381 studies (the meta-TENS study) // *BMJ open*. 2022. Vol. 12. Is. 2. P. e051073. DOI: 10.1136/bmjopen-2021-051073.

17. Baindara P., Chowdhury T., Roy D., Mandal M., Mandal S. M. Surfactin-like lipopeptides from *Bacillus clausii* efficiently bind to spike glycoprotein of SARS-CoV-2 // *Journal of biomolecular structure & dynamics*. 2023. Vol. 41. Is. 23. P. 14152–14163. DOI: 10.1080/07391102.2023.2196694.

18. You D., Qin L., Li K., Li D., Zhao G., Li L. A meta-analysis on advantages of peripheral nerve block post-total knee arthroplasty // *The Korean journal of pain*. 2021. Vol. 34. Is. 3. P. 271–287. DOI: 10.3344/kjp.2021.34.3.271.

19. Espinoza A., Leyton P., Robles M., Vargas J., Muñoz L. Continuous peripheral nerve blocks for pain control after orthopaedic surgery: A prospective study during in-hospital and ambulatory care // *European journal of anaesthesiology and intensive care*. 2025. Vol. 4. Is. 1. P. e0067. DOI: 10.1097/EA9.0000000000000067.

20. Abd-Elseyed A., Kennedy K. The art of radiofrequency ablation // *Annals of palliative medicine*. 2024. Vol. 13. Is. 3. P. 471–476. DOI: 10.21037/apm-24-3.

21. Soetjahjo B., Adriansyah D., Yudistira M., Rahman A., Herman H., Diwan S. The Analgesic Effectiveness of Genicular Nerve-targeted Cooled and Pulsed Radiofrequency Ablation for Osteoarthritis Knee Pain: A Systematic Review and Meta-analysis // *Pain physician*. 2024. Vol. 27. Is. 7. P. 357–373. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39353105/> (дата обращения: 10.04.2026).

22. Pirri C., Sorbino A., Manocchio N., Pirri N., Devito A., Foti C., Migliore A. Chondrotoxicity of Intra-Articular Injection Treatment: A Scoping Review // *International journal of molecular sciences*. 2024. Vol. 25. Is. 13. P. 7010. DOI: 10.3390/ijms25137010.

23. Asim M., Azim M. E., Siddiqi F. A., Rathore F. A. Multimodal approach to address the multifaceted nature of Chronic Musculoskeletal Disorders: Bridging the gap between research and clinical practice // *The Journal of the Pakistan Medical Association*. 2024. Vol. 74. Is. 6. P. 1199–1201. DOI: 10.47391/JPM.24-44.

24. Chang J. R., Cheung Y. K., Sharma S., Li S. X., Tao R. R., Lee J. L. C., Sun E. R., Pinto S. M., Zhou Z., Fong H., Chan W. W., Zheng K., Samartzis D., Fu S. N., Wong A. Y. Comparative effectiveness of non-pharmacological interventions on sleep in individuals with chronic musculoskeletal pain: A systematic review with network meta-analysis // *Sleep medicine reviews*. 2024. Vol. 73. P. 101867. DOI: 10.1016/j.smrv.2023.101867.

25. Broachwala M. Y., Parikh N. N., Anderson C., Schuster N. M. An Overview of Invasive Pain Management Treatments Including Regenerative Approaches // *Neurologic clinics*. 2025. Vol. 43. Is. 3. P. 517–531. DOI: 10.1016/j.ncl.2025.04.004.

26. Patselas T., Karanasios S., Sakellari V., Fysekis I., Patselas M. I., Gifotsos G. EMG activity of the serratus anterior and trapezius muscles during elevation and PUSH UP exercises // *Journal of bodywork and movement therapies*. 2021. Vol. 27. P. 247–255. DOI: 10.1016/j.jbmt.2021.02.002.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

СТАТЬЯ

УДК 519.713



CC BY 4.0

РОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАЗМЕРНОСТИ В ДИНАМИКЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ С ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ

¹Клеммер П. С., ²Шебанов В. В.

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта», Москва, Российская Федерация,
e-mail: pavel.klemmer@mail.ru;

²Частное образовательное учреждение высшего образования «Московский университет
имени С. Ю. Витте», Москва, Российская Федерация

В работе исследована динамика стохастических клеточных автоматов с асинхронным вероятностным обновлением в двумерной и трёхмерной пространственных решётках при локализованных начальных условиях. Целью работы являлось установление влияния размерности пространства и глобальной начальной плотности активных клеток (в диапазоне 0,10–0,25) на характер эволюции макроскопических характеристик – доли живых клеток и информационной энтропии Шеннона. Проведено численное моделирование ансамблей из 50 независимых реализаций для каждой конфигурации, выполнен анализ временных рядов, фазовых портретов в координатах (S , dS/dt) и траекторий в плоскости (ρ , S), вычислены времена релаксации, коэффициенты вариации и длины фазовых путей. Установлено, что трёхмерная система демонстрирует ускоренную релаксацию средней плотности к квазистационарному уровню (τ в 3D существенно меньше, чем в 2D) при сохранении высокой энтропии и незатухающих флуктуаций, формируя квазистационарный флуктуирующий режим. Двумерный автомат, напротив, проявляет диссипативный характер с монотонным снижением плотности и энтропии, высокой чувствительностью к стохастическим флуктуациям и сходимостью к точечному аттрактору. Выявленные различия объяснены топологическими особенностями границы начального очага и координационным числом решётки. Результаты подчёркивают фундаментальную роль пространственной размерности в процессах самоорганизации дискретных активных сред.

Ключевые слова: квазистационарное состояние, самоорганизация, клеточный автомат, стохастическая энтропия Шеннона, квазистационарность, локализованные начальные условия, фазовый портрет, 2D/3D-моделирование

THE ROLE OF SPATIAL DIMENSION IN THE DYNAMICS OF STOCHASTIC CELLULAR AUTOMATA WITH LOCALIZED INITIAL CONDITIONS

¹Klemmer P. S., ²Shebanov V. V.

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Russian University of Transport”, Moscow, Russian Federation, e-mail: pavel.klemmer@mail.ru;
²Private Educational Institution of Higher Education
“Moscow University named after S. Yu. Witte”, Moscow, Russian Federation

This study investigates the dynamics of stochastic cellular automata with asynchronous probabilistic updating on two- and three-dimensional spatial lattices under localized initial conditions. The aim of the work was to determine how the spatial dimension and the global initial density of active cells (in the range of 0.10–0.25) affect the evolution of macroscopic characteristics – namely, the fraction of living cells and the Shannon information entropy. Numerical simulations were performed for ensembles of 50 independent realizations for each configuration. Time series, phase portraits in the coordinates (S , dS/dt), and trajectories in the (ρ , S) plane were analyzed; relaxation times, coefficients of variation, and phase-path lengths were computed. It is found that the three-dimensional system exhibits accelerated relaxation of the mean density to a quasi-stationary level (τ in 3D is significantly smaller than in 2D) while maintaining high entropy and undamped fluctuations, thus forming a quasi-stationary fluctuating regime. In contrast, the two-dimensional automaton shows a dissipative nature with a monotonic decrease in density and entropy, high sensitivity to stochastic fluctuations, and convergence to a point attractor. The observed differences are explained by the topological features of the initial cluster boundary and the lattice coordination number. The results highlight the fundamental role of spatial dimensionality in the self-organization of discrete active media.

Keywords: quasi-stationary state, self-organization, cellular automaton, Shannon stochastic entropy, quasi-stationarity, localized initial conditions, phase portrait, 2D/3D modeling

Введение

Понимание того, как из локальных правил рождается глобальная упорядоченность, давно находится в фокусе вычислительной физики. Клеточные автоматы (КА)

остаются удобным инструментом для таких исследований благодаря своей дискретной природе и богатству коллективных режимов. Фундаментальная классификация, предложенная С. Вольфрамом [1], разде-

лила элементарные КА на четыре класса – от тривиально однородных до хаотических и сложных. Общая теория КА как дискретных динамических систем подробно изложена в работе А. Илацинского [2]. Одним из важнейших результатов стало доказательство универсальности по Тьюрингу для игры «Жизнь» [3], что показало принципиальную вычислительную мощность даже простых автоматных правил.

Для количественного анализа разнообразия динамик активно используются энтропийные подходы. В частности, К. Лэй с соавторами [4] предложили классификацию элементарных КА при асинхронном обновлении, основанную на поведении энтропии. В работе [5] развили информационно-теоретический взгляд на классификацию клеточных автоматов. Обзор математических моделей КА и их приложений представлен в работе А. И. Лобанова [6]. Отдельного внимания заслуживают клеточно-автоматные методы решения задач математической физики на гексагональных сетках, детально описанные И. В. Матюшкиным (в двух частях) [7; 8], а также обзор современных отечественных публикаций по КА [9]. Важным направлением является изучение стохастических и термодинамических свойств КА. К. Поморски и Д. Котула [10] исследовали термодинамику стохастической версии игры «Жизнь», выявив аналогии с фазовыми переходами. А. С. Алешкин с соавторами [11] разработали математическое и программное обеспечение для стохастических КА с памятью. О. Л. Бандман [12] проанализировал режимы функционирования асинхронных КА, моделирующих нелинейную пространственную динамику. Предшествующие работы самих авторов [13] были посвящены систематическому исследованию поведения стохастической энтропии в двумерных и трёхмерных КА.

Прикладные аспекты КА охватывают широкий круг задач. С. К. Саруханян [14] предложил подход к численной оценке адекватности трёхмерной клеточно-автоматной модели диффузии вещества. Н. М. Ершов и А. М. Попов [15] применили стохастические блочные КА с окрестностью Маркова для моделирования химических и биологических систем. Влияние исходной конфигурации распределения живых клеток на стохастическую энтропию системы КА было исследовано В. В. Шебановым [16]. Наконец, А. А. Шибков и С. С. Кочегаров [17] использовали клеточно-автоматное моделирование для изучения эволюции фрактального коррозионного фронта. Несмотря на обилие работ, большинство численных экспериментов со стохастическими КА опирается

на однородные начальные условия с фиксированной глобальной плотностью активных клеток по всей решётке. Однако во многих реальных процессах активация нейронного ансамбля, рост опухолевого очага, локальное возгорание, активность изначально сосредоточены в ограниченной пространственной области. Подчеркнём, эти примеры приведены исключительно для мотивации; наша модель не воспроизводит специфику нейронных, онкологических или горючих сред (общие подходы к такому моделированию можно найти в обзорах [6; 9]). Вопрос о том, как меняется эволюция КА при переходе от равномерного распределения к компактному очагу и какую роль в этом играет размерность пространства (2D против 3D), остаётся недостаточно изученным.

Цель настоящей работы – определить характер динамики стохастического клеточного автомата с локализованным начальным условием в зависимости от размерности решётки и глобальной начальной плотности активных клеток. Для этого решаются следующие задачи: анализ временных рядов доли живых клеток $\rho(t)$ и глобальной энтропии Шеннона $S(t)$, построение фазовых портретов в координатах $(S, dS/dt)$ и (ρ, S) , вычисление времени релаксации τ и сравнение статистических характеристик стационарных режимов по ансамблям независимых реализаций.

Описание математической модели

Рассматривается стохастический КА на пространственной решётке размерности $d = 2$ или $d = 3$. Каждая клетка может находиться в одном из двух состояний: $\sigma_i = 1$ («живая») или $\sigma_i = 0$ («мёртвая»). Время t дискретно, $t = 0, 1, 2, \dots, N$. Состояние всей системы в момент t задаётся конфигурацией $\Omega(t) = \{\sigma_i(t)\}$. Эволюция клеток определяется вероятностным правилом, зависящим от числа живых соседей в окрестности Мура. Для клетки i на шаге t вычисляется количество $n_i(t)$ соседних клеток, находящихся в состоянии 1. В двумерном случае окрестность Мура включает 8 соседей, в трёхмерном – 26 соседей.

Вероятность $P_i(t)$ того, что клетка i окажется живой на следующем временном шаге, задаётся сигмоидной (логистической) функцией:

$$P_i(t) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta((n_i) - \theta))}, \quad (1)$$

где θ – пороговое число соседей (при $n_i = \theta$ вероятность активации равна 0,5), β – параметр крутизны (чем больше β , тем ближе правило к детерминированному пороговому).

Обновление состояний происходит асинхронно: на каждом временном шаге каждая клетка независимо с вероятностью α выбирается для попытки изменения состояния. Выбранная клетка переходит в состояние 1, если случайное число $\xi \sim U[0,1]$ меньше $P_i(t)$; в противном случае переходит в 0. Клетки, не выбранные для обновления, сохраняют своё текущее состояние. Параметр α регулирует степень синхрон-

ности: $\alpha = 1$ соответствует полностью синхронному обновлению, малые α – сильно асинхронному.

Основной характеристикой глобальной динамики системы является доля живых клеток (плотность):

$$\rho(t) = \frac{1}{M} \sum_i \sigma_i(t), \quad (2)$$

где M – общее число клеток в решётке.

В качестве информационной меры используется энтропия по плотности:

$$S(t) = H(\rho(t)) = -\rho(t) \cdot \log_2 \rho(t) - (1 - \rho(t)) \log_2 (1 - \rho(t)). \quad (3)$$

Подчеркнём: $S(t)$ – это бинарная энтропия Шеннона, вычисленная по глобальной доле живых клеток $\rho(t)$. Она не является мерой пространственной сложности (не учитывает взаимное расположение активных клеток) и чувствительна только к изменению средней активности. Такая мера вычислительно проста и удобна для массовых ансамблевых расчётов, особенно в трёхмерном случае, где полный пространственный анализ потребовал бы существенно больших ресурсов.

Поскольку каждая реализация стохастического КА содержит случайную составляющую, анализ проводится на ансамбле из N независимых запусков с одинаковыми начальными условиями. Для каждого момента времени t вычисляются средние по ансамблю:

$$\langle \rho_k(t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \rho_k(t), \langle S(t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_k(t), \quad (4)$$

где $\rho_k(t)$ – плотность активных клеток в k -й реализации на шаге t . Аналогично вычисляется средняя энтропия, где $S_k(t) = H(\rho_k(t))$ согласно формуле (3).

Стационарные значения ρ_∞ и S_∞ определяются дополнительным усреднением $\langle \rho(t) \rangle$ и $\langle S(t) \rangle$ по заключительному интервалу моделирования ($t = 801, \dots, 1000$).

Формула для времени релаксации τ :

$$\tau = \min \left\{ t \mid \left| \langle \rho(t) \rangle - \rho_\infty \right| < \frac{\left| \langle \rho(0) \rangle - \rho_\infty \right|}{e} \right\}, \quad (5)$$

где ρ_∞ – стационарная средняя плотность, вычисленная по интервалу $t = 801 \dots 1000$.

Время релаксации τ определяется как наименьший номер шага t , для которого выполняется условие

$$\left| \langle \rho(t) \rangle - \rho_\infty \right| < \left| \langle \rho(0) \rangle - \rho_\infty \right| / e,$$

где e – основание натурального логарифма.

Длина фазовой траектории в плоскости (ρ, S) вычисляется как

$$L = \sum_{t=1}^T \left[\left(\langle \rho(t) \rangle - \langle \rho(t-1) \rangle \right)^2 + \left(\langle S(t) \rangle - \langle S(t-1) \rangle \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

Коэффициент вариации стационарной плотности $CV = \sigma_\rho / \rho_\infty$, где σ_ρ – стандартное отклонение значений ρ_k , усреднённых по последним 100 шагам для каждой реализации.

$$\sigma_\rho = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(\rho_k^{\text{стац}} - \rho_\infty \right)^2}, \quad (7)$$

где $\rho_k^{\text{стац}}$ – средняя плотность k -й реализации на заключительном интервале.

Для количественной оценки пространственной структуры вводится размер крупнейшего кластера $C_{\max}(t)$ – число клеток в наибольшем связном (по окрестности Мура) множестве живых клеток, а также корреляционная длина ξ , оцениваемая по спаду радиальной функции корреляции $g(r)$:

$$g(r) = \frac{\langle \sigma_i \sigma_j \rangle_{|i-j|=r} - \rho^2}{\rho(1-\rho)}, \quad (8)$$

где усреднение проводится по всем парам клеток на расстоянии r .

Корреляционная длина ξ определяется из условия $g(r) \propto \exp(-r/\xi)$ на начальном участке.

Параметры симуляций

Численные эксперименты проводились для 2D и 3D КА с асинхронным вероятностным обновлением. Размеры решёток выбраны следующие: 50×50 клеток для 2D и $30 \times 30 \times 30$ клеток для 3D. Граничные условия задавались периодическими, однако за время наблюдения (1000 шагов) влияние границ на динамику центрального очага оставалось пренебрежимо малым.

Параметры логистического правила перехода (1) задавались индивидуально для каждой размерности и приведены в таблице 1 вместе с остальными параметрами экспериментов.

Таблица 1

Параметры численных экспериментов для КА

Параметр	2D	3D
Размер решётки, L	50×50	$30 \times 30 \times 30$
Порог активации, θ	4,00	13,73
Крутизна сигмоиды, β	2,00	0,15
Вероятность обновления, α	0,20	0,15
Плотность в очаге, $\rho_{\text{очаг}}$	0,92	
Фоновая плотность, $\rho_{\text{фон}}$	0,025	
Целевые $\rho_0^{\text{глоб}}$	0,10; 0,15; 0,20; 0,25	
Радиус очага для $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,10$	8	8
Радиус очага для $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,15$	11	10
Радиус очага для $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,20$	12	11
Радиус очага для $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,25$	14	12
Число реализаций, N	50	
Длительность реализации, T	1000 шагов	

*Источник: составлено авторами.

Начальная конфигурация формировалась как локализованный очаг высокой плотности в центре решётки. Внутри очага (круг в 2D или сфера в 3D) каждая клетка объявлялась живой с вероятностью $\rho_{\text{очаг}} = 0,92$. Вне очага задавался разреженный случайный фон с вероятностью $\rho_{\text{фон}} = 0,025$ на клетку. Радиус очага r подбирался таким образом, чтобы средняя доля живых клеток по всей решётке в начальный момент равнялась заданному $\rho_0^{\text{глоб}}$. Для этого решалось уравнение баланса объёмов:

$$\rho_0^{\text{глоб}} = \frac{V_{\text{очаг}} \cdot \rho_{\text{очаг}} + \rho_{\text{фон}} (V_{\text{общ}} - V_{\text{очаг}})}{V_{\text{общ}}}, \quad (9)$$

где $V_{\text{общ}}$ – общее число клеток, $V_{\text{очаг}}$ – объём очага, выражаемый через радиус, $\rho_{\text{фон}} = 0,025$ – фоновая плотность вне очага.

Программная реализация выполнена на языке Python 3.11 в среде Google Colab. Для ускорения матричных операций и вычисления свёрток применялась библиотека NumPy (версия 1.24). Визуализация результатов осуществлялась средствами Matplotlib (3.7) и Seaborn (0.12). Статистическая обработка данных проводилась с использованием модуля SciPy.stats. Генератор случайных чисел – numpy.random.PCG64 с фиксированным seed=20250415. Для снижения вычислительной нагрузки при расчёте окрестностей Мура использовались операции с циклическими сдвигами массивов (функции np.roll).

Результаты исследования и их обсуждение

Проведённые численные эксперименты позволяют детально проследить, каким об-

разом пространственная размерность и начальная глобальная плотность активных клеток влияют на эволюцию стохастического клеточного автомата с локализованным источником возбуждения. В данном разделе последовательно рассматриваются: структура начальных конфигураций, временные ряды плотности $\rho(t)$ и энтропии $S(t)$, фазовый портрет в координатах $(S, dS/dt)$ и траектории в плоскости (ρ, S) . Каждый из представленных графиков содержит сопоставление результатов для двумерного и трёхмерного случаев при четырёх значениях $\rho_0^{\text{глоб}} = (0,10; 0,15; 0,20; 0,25)$.

На рисунке 1 приведены примеры стартовых конфигураций для 2D и 3D при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,15$. В левой части показана 2D-решётка с выделенной окружностью радиуса $r = 11$ клеток. В центральной части рисунка представлено сечение трёхмерной решётки плоскостью $z = 15$; радиус сферического очага в этом случае равен $r = 10$ клеткам. Правая панель демонстрирует интегральную проекцию трёхмерного

начального состояния на плоскость XY, где цветом закодирована доля живых клеток вдоль направления Z.

В двумерном случае очаг занимает заметную долю площади решётки (примерно 15% при $r = 11$), и его граница имеет относительно малую протяжённость. В трёхмерной системе при том же значении $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,15$ радиус очага составляет всего 10 клеток, а его объём не превышает 10,0% от общего числа клеток. Таким образом, в 3D начальное возмущение оказывается более компактным в относительных единицах, но при этом каждая клетка на границе сферы взаимодействует с существенно большим числом соседей (до 26 против 8 в 2D).

Ключевой макроскопической характеристикой системы является глобальная плотность активных клеток $\rho(t)$. На рисунке 2 представлены усреднённые по ансамблю временные ряды $\langle \rho(t) \rangle$ для 2D и 3D КА. Для наглядности также показаны коридоры стандартных отклонений, отражающие разброс траекторий внутри ансамбля.

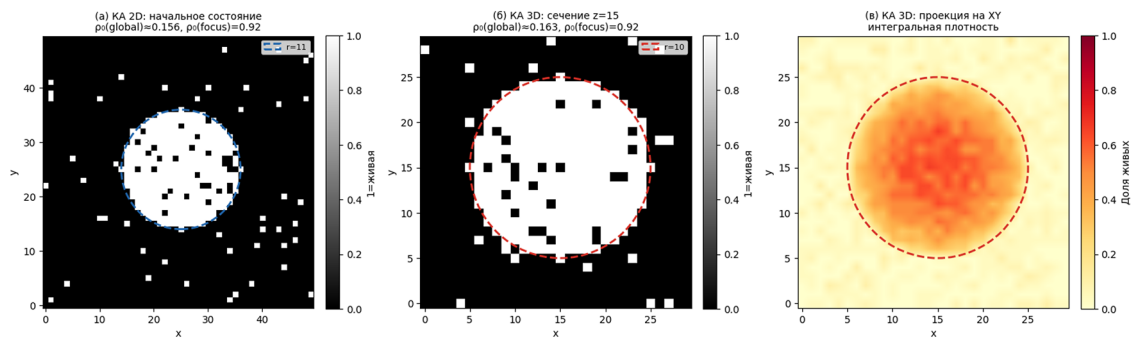


Рис. 1. Начальные конфигурации клеточных автоматов при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,15$: а) 2D-решётка; б) центральное сечение 3D-решётки; в) проекция 3D-распределения на плоскость XY
Источник: составлено авторами

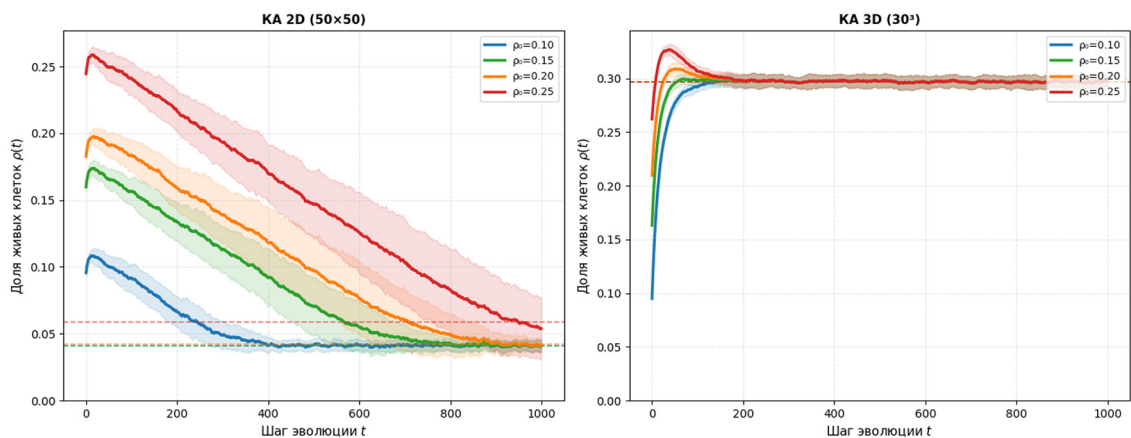


Рис. 2. Динамика доли живых клеток $\rho(t)$ при различных значениях $\rho_0^{\text{глоб}}$: а) 2D-решётка; б) 3D-решётка
Источник: составлено авторами

Анализ кривых выявляет качественное различие в характере эволюции плотности. В двумерном случае для всех $\rho_0^{\text{глоб}}$ наблюдается монотонное убывание $\rho(t)$ на всём протяжении интервала моделирования. Скорость спада существенно зависит от начальной плотности: при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,10$ плотность снижается до стационарного уровня 0,039 за 297 шагов, при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,15$ – до 0,042 за 423 шага, при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,20$ – до 0,045 за 520 шагов, при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,25$ – до 0,061 за 595 шагов (табл. 2). Такое поведение объясняется последовательным «схлопыванием» очага от периферии к центру, причём более крупный очаг требует большего числа итераций для полного угасания.

В трёхмерной системе динамика плотности имеет иной характер. На начальном этапе (первые 50-100 шагов) происходит резкий рост, после чего кривые выходят на квазистационарный уровень и начинают флуктуировать около него. В отличие от 2D, дальнейшего монотонного убывания не наблюдается. Более того, для $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,15$ и выше после 200-го шага заметны небольшие, но устойчивые колебания плотности с амплитудой порядка 0,005, которые не затухают вплоть до конца симуляции. Это указывает на то, что трёхмерная система не приходит к статическому равновесию, а демонстрирует долгоживущие, не затухающие за 1000 шагов колебания плотности и энтропии, что соответствует квазистационарному, а не статическому режиму.

Дополнительную информацию о характере самоорганизации даёт анализ энтропии Шеннона $S(t)$, вычисленной по формуле (3), напомним, что это бинарная энтропия по глобальной плотности (см. раздел 2), по-

этому она отражает лишь степень разупорядоченности средней активности, а не пространственную структуру. На рисунке 3 показаны усреднённые по ансамблю кривые $\langle S(t) \rangle$ для тех же значений $\rho_0^{\text{глоб}}$.

В двумерной системе энтропия монотонно убывает на всём интервале наблюдения. Скорость спада зависит от начальной глобальной плотности: при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,10$ выход на стационар происходит примерно за 300 шагов, при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,25$ этот процесс растягивается до 600 шагов. Конечные значения энтропии для всех $\rho_0^{\text{глоб}}$ лежат в узком диапазоне $S_\infty \approx 0,25-0,32$ бит, что соответствует почти полностью стационарной решётке с редкими вкраплениями активных клеток. Разброс между реализациями относительно невелик, но заметно увеличивается с ростом начальной плотности.

В трёхмерной системе динамика энтропии носит качественно иной характер. После резкого начального роста (первые 50–100 шагов) кривые выходят на промежуточное плато и начинают флуктуировать около него. В отличие от двумерного случая, дальнейшего монотонного снижения не наблюдается. Стационарные значения энтропии S_∞ для 3D заметно выше, чем для 2D, и составляют от 0,83 бит при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,10$ до 0,897 бит при $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,25$ (табл. 2). Кроме того, на кривых после 200-го шага отчетливо видны незатухающие осцилляции с амплитудой порядка 0,02–0,05 бит, что указывает на продолжающуюся перестройку пространственной структуры.

Проведя сравнение результатов по рисункам 2 и 3, можно обобщить, что динамика клеточных автоматов различных размерностей имеет кардинальные различия.

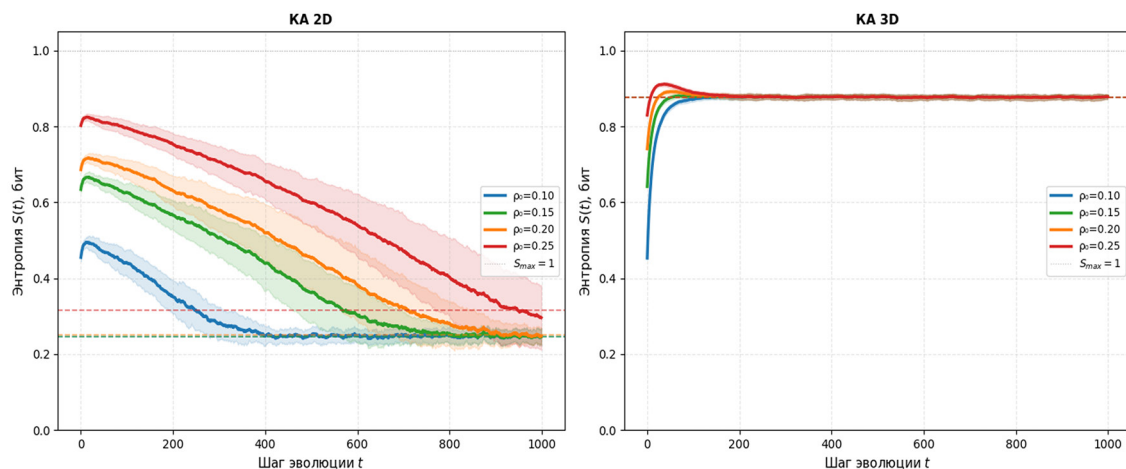


Рис. 3. Динамика энтропии $S(t)$ при различных значениях $\rho_0^{\text{глоб}}$:

а) 2D-решётка; б) 3D-решётка

Источник: составлено авторами

Для 2D КА плотность и энтропия меняются синхронно, величины монотонно убывают и достигают стационарных значений одновременно. Иными словами, диссипация активности здесь напрямую связана с упрощением пространственной структуры – система эволюционирует к статическому равновесию. Совсем иначе дело обстоит в 3D. Плотность $\rho(t)$ перестаёт заметно меняться уже после 150-175 шагов, а энтропия $S(t)$ при этом продолжает колебаться до самого конца расчётов. Получается, что макроскопическая активность быстро закрепляется на некотором квазистационарном уровне, тогда как локальная организация ещё долго перестраивается – кластеры живых клеток обмениваются возбуждением, меняют форму, но всё это почти не сказывается на средней доле активных узлов.

Для проверки того, что периодические границы не искажают динамику в течение 1000 шагов, были проведены контрольные расчёты. В двумерном случае очаг со временем только сжимается, поэтому его граница заведомо не достигает края решётки 50×50 . В трёхмерном случае возможен рост кластеров, поэтому мы повторили серию экспериментов для $\rho_0^{\text{глоб}} = 0,20$ на расширенной решётке $40 \times 40 \times 40$ (объём в 2,37 раза больше исходной). Сравнение усреднённых траекторий $\langle \rho(t) \rangle$ и $\langle S(t) \rangle$ для исходной (30^3) и расширенной (40^3) решёток показало, что различия не превышают 0,005 по плотности и 0,02 бит по энтропии на всём интервале $t = 0 \dots 1000$, что лежит в пределах стандартной ошибки ансамбля. Следовательно, при размере 30^3 влияние периодических границ на наблюдаемые режимы пренебрежимо мало.

Далее рассмотрим фазовую плоскость $dS/dt - S$. Соответствующие портреты для

2D- и 3D-автоматов, построенные по усреднённым траекториям, приведены на рисунке 4. Производную находили численно, сгладив временной ряд скользящим средним.

На плоскости $(S, dS/dt)$ все траектории двумерного автомата, какой бы ни была начальная плотность, скручиваются в спирали и постепенно стягиваются к неподвижным точкам, где $S = S_\infty$, а производная почти нулевая. С ростом $\rho_0^{\text{глоб}}$ начальная энтропия и размах производной на старте увеличиваются, однако качественная картина от этого не меняется – система диссипативно скатывается к статическому равновесию.

Трёхмерный случай выглядит иначе. Ни при одном из рассмотренных значений $\rho_0^{\text{глоб}}$ траектории не сходятся к изолированной точке. Вместо этого они стягиваются к компактным областям возле S_∞ (от 0,83 до 0,90 бит) и там продолжают осциллировать. Даже на больших временах, после 800 шагов, dS/dt регулярно меняет знак, достигая значений порядка $\pm 0,5 \cdot 10^{-2}$ бит/шаг. С увеличением начальной плотности центр такой области смещается вправо, а сама она слегка разрастается. По существу, аттрактор здесь представляет собой не точку, а целое множество в фазовом пространстве – именно это свойство и указывает на квазистационарный характер трёхмерной динамики во всём исследованном диапазоне начальных условий.

Для сопоставления динамики рассмотрим траектории КА в координатах «плотность – энтропия», представленные на рисунке 5. Каждая кривая соответствует одному значению $\rho_0^{\text{глоб}}$ и получена усреднением по ансамблю.

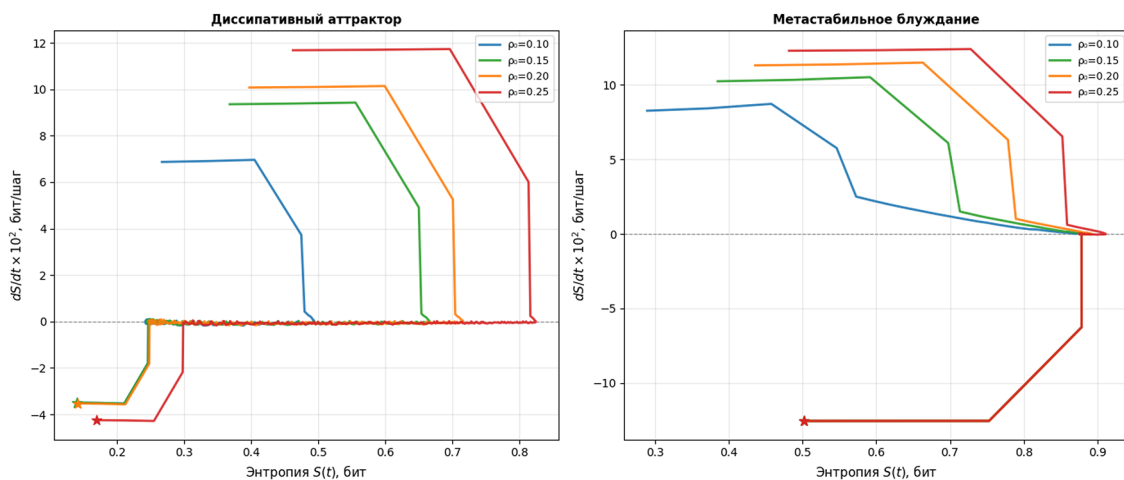


Рис. 4. Фазовый портрет в координатах $(S, dS/dt)$: а) 2D; б) 3D
Источник: составлено авторами

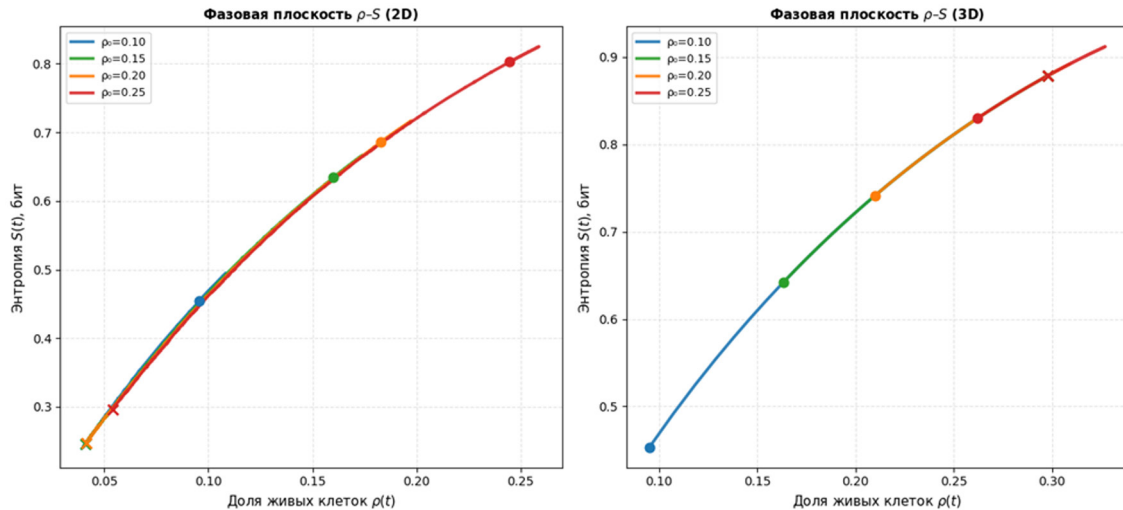


Рис. 5. Фазовые траектории в пространстве (ρ, S) для 2D (слева) и 3D (справа) при различных $\rho_0^{\text{глоб}}$
 Источник: составлено авторами

Трёхмерные фазовые траектории (ρ, S) значительно длиннее двумерных: отношение L_3D/L_2D достигает 2,73 при $\rho_0 = 0,15$ и растёт с начальной плотностью. В 2D все траектории имеют выпуклый профиль и сходятся в узкую область с $S_{\infty} \approx 0,2-0,335$ бит независимо от ρ_0 , что указывает на быструю потерю структурного разнообразия и диссипативный коллапс. В 3D конечные точки разнесены по оси S : с ростом ρ_0 стационарная энтропия увеличивается от 0,83 до 0,90 бит, траектории демонстрируют изломы и возвратные движения, а энтропия продолжает флуктуировать после стабилизации плотности – это парадоксальное сочетание быстрой релаксации плотности с большой длиной фазового пути. Таким образом, увеличение размерности пространства меняет характер эволюции: от диссипативного коллапса к квазистаци-

онарному блужданию с сохранением внутренней структурной сложности.

Сравнительный анализ динамических режимов двумерного и трёхмерного клеточных автоматов

В таблице 2 представлены основные количественные показатели, характеризующие стационарный режим и переходный процесс для каждого значения глобальной начальной плотности $\rho_0^{\text{глоб}}$. На рисунке 6 приведены автокорреляционные функции, демонстрирующие влияние начальной плотности на время памяти системы.

Для всех величин в таблице 2 стандартная ошибка среднего (SEM) не превышает: для $\rho_{\infty} - 0,0025$, для $S_{\infty} - 0,01$ бит, для $\tau - 12$ шагов, для $CV - 1.25\%$, для $L - 0,015$ у. е. (рассчитано по ансамблю из 50 реализаций). Соответственно, 95%-ные доверительные интервалы имеют ширину ± 2 SEM.

Таблица 2

Статистические характеристики эволюции клеточных автоматов 2D и 3D*

$\rho_0^{\text{глоб}}$	Размерность	r (ячеек)	ρ_{∞}	S_{∞} (бит)	τ (шагов)	CV (%)	L (у.е.)
0,10	2D	8	0,039	0,247	297	38,2	0,107
	3D	8	0,31	0,827	112	5,1	0,241
0,15	2D	11	0,042	0,242	423	42,1	0,162
	3D	10	0,297	0,852	126	6,3	0,442
0,20	2D	12	0,045	0,255	520	44,5	0,204
	3D	11	0,297	0,877	137	5,8	0,589
0,25	2D	14	0,061	0,321	595	45,7	0,251
	3D	12	0,297	0,897	176	6,0	0,673

*Источник: составлено авторами.

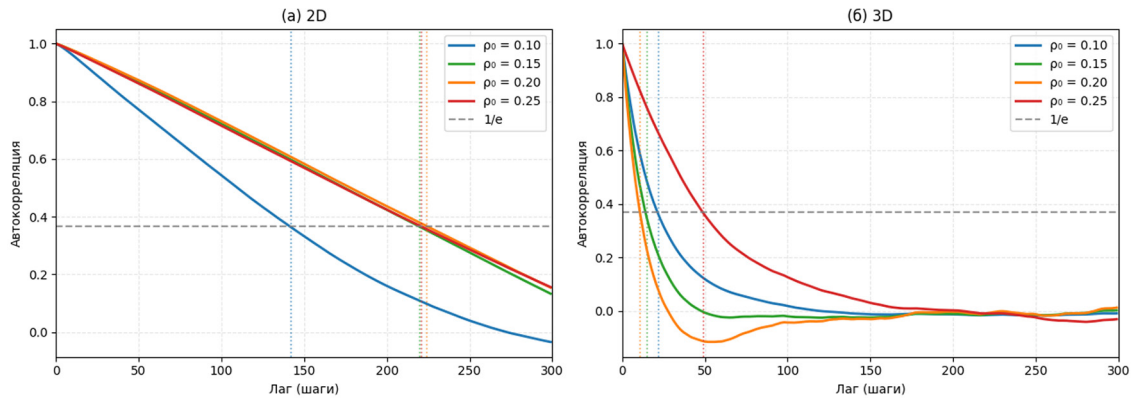


Рис. 6. Влияние начальной глобальной плотности на автокорреляционную функцию
Источник: составлено авторами

Чтобы убедиться, что наблюдаемые различия между 2D и 3D обусловлены именно размерностью, а не разными значениями параметров в таблице 1, были проведены дополнительные серии расчётов. Во-первых, порог активации был отнормирован на число соседей: для 2D $\theta/8 = 0,5$, для 3D $\theta/26 \approx 0,528$. Во-вторых, параметр крутизны β варьировался в пределах 1,5–2,5 (2D) и 0,1–0,2 (3D). В-третьих, вероятность асинхронного обновления α менялась от 0,1 до 0,3 для обеих размерностей. Ни при одной из этих вариаций качественная картина не изменилась: двумерный автомат неизменно демонстрирует монотонную диссипацию и сходимость к точечному аттрактору, тогда как трёхмерный сохраняет незатухающие флуктуации плотности и энтропии. Следовательно, корень различий лежит в топологии решётки и координационном числе, а не в подборе параметров.

Сводные результаты статистики, приведённые в таблице 2, и автокорреляционные функции на рисунке 6 показывают принципиально различную динамику двумерного и трёхмерного клеточных автоматов. В 2D время релаксации τ монотонно растёт с начальной глобальной плотностью от 297 до 595 шагов, а время памяти τ_{mean} – от 150 до 300 шагов. В 3D обе величины значительно меньше ($\tau = 112–176$ шага, $\tau_{mean} = 20–50$ шагов) и практически не зависят от ρ_0^{glob} . При этом стационарная плотность ρ_∞ в 2D остаётся низкой (0,039–0,061) и слабо меняется, тогда как в 3D она колеблется с начальной плотностью от 0,29 до 0,31, а энтропия S_∞ – от 0,83 до 0,90 бит, что заметно выше, чем в 2D (0,24–0,3 бит). Коэффициент вариации CV в 2D достигает 38–46%, указывая на высокую чувствительность к случайным флуктуациям, а для 3D он не превышает 5%, свидетельствуя о детерминированной воспроизводимости макросостояния.

Для проверки того, сохраняется ли в 3D более сложная пространственная организация, мы вычислили размер крупнейшего кластера $C_{max}(t)$ и корреляционную длину ξ в стационарном режиме. В 2D уже после 100 шагов C_{max} падает до 1–2 клеток, что соответствует изолированным точкам. В 3D C_{max} после начального роста стабилизируется на уровне 30–50 клеток для $\rho_0 = 0,15$, причём форма кластеров постоянно меняется. Корреляционная длина ξ в 2D не превышает 1,5 шага решётки, в 3D достигает 3–4 шагов. Эти данные подтверждают, что трёхмерная система действительно сохраняет пространственную сложность, а не только флуктуации глобальной плотности.

Различие в динамике 2D- и 3D-автоматов определяется топологией границы очага и координационным числом: в 2D краевые клетки имеют лишь 3–4 активных соседа из 8, что вызывает послойное схлопывание очага и затяжной диссипативный процесс; в 3D каждая граничная клетка взаимодействует с 9–10 соседями из 26, обеспечивая быстрое растекание возбуждения и выход плотности на квазистационарный уровень за значительно более короткое время. При этом ускоренная релаксация плотности в 3D не обедняет внутреннюю динамику – длина фазовой траектории (ρ, S) в 2–3 раза больше, энтропия совершает незатухающие флуктуации, что соответствует IV классу по Вольфраму (квазистационарная самоорганизация), тогда как 2D-автомат ведёт себя как типичная диссипативная система I–II классов, остро реагируя на стохастические возмущения. Таким образом, тип динамики задаётся прежде всего пространственной размерностью, а начальная глобальная плотность (0,10–0,25) лишь модулирует количественные проявления этих закономерностей.

Заключение

Численные расчёты показали глубокие различия между двумерной и трёхмерной динамикой стохастического клеточного автомата при локализованном старте. Время релаксации τ в трёхмерной системе составило 112–176 шагов, в двумерной – 297–595 шагов. Стационарная энтропия в 3D находилась в интервале 0,83–0,90 бит, в 2D – 0,24–0,32 бит, а фазовая траектория в координатах (ρ, S) оказывалась длиннее в 2–3 раза. Коэффициент вариации CV в 2D достигал 38–46%, в 3D не превышал 6,3% (составлял 5–6%). Фазовые портреты укрепили эту картину: в 2D траектории стягиваются к точечному аттрактору, в 3D траектории не сходятся к неподвижной точке, а остаются в ограниченной области фазового пространства, совершая незатухающие колебания на всём интервале наблюдения (1000 шагов).

Корень этих различий – в топологии границы начального очага. На плоской решётке краевые клетки окружены всего 3–4 активными соседями из 8, чего недостаточно для самоподдержания, и очаг послойно гаснет от периферии к центру, теряя структурную сложность. В трёхмерном объёме на границе у каждой клетки набирается в среднем 9–10 живых соседей из 26 – возбуждение получает шанс сохраниться и быстро растекается по решётке, формируя устойчивый квазистационарный режим. По классификации Вольфрама, двумерный автомат демонстрирует черты I–II классов (откат к простому аттрактору, высокая чувствительность к шуму), а трёхмерный – IV класс (квазистационарная самоорганизация с долгоживущими перестройками и стабильно высокой энтропией). Изменение начальной глобальной плотности от 0,10 до 0,25 не ломает эту качественную картину, а лишь усиливает количественные проявления.

Список литературы

1. Wolfram S. A New Kind of Science. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002. 1197 p. URL: <https://horizons-2000.org/92.%20Misc%20Files/Reading/Wolfram%20-%20A%20New%20Kind%20of%20Science.pdf> (дата обращения: 12.03.2026). ISBN: 978-1-57955-008-0.
2. Ilachinski A. Cellular automata: a discrete universe. World Scientific Publishing Company, 2001. 808 p. URL: http://lib.ysu.am/disciplines_bk/10601885498bd77aa5069c30185beabd.pdf (дата обращения: 12.05.2026). ISBN: 981-02-4623-4.
3. Rendell P. Turing Machine Universality of the Game of Life. Cham: Springer International Publishing, 2016. 182 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19842-2. ISBN: 978-3-319-19841-5.
4. Lei Q., Lee J., Huang X., Kawasaki S. Entropy-Based Classification of Elementary Cellular Automata under

Asynchronous Updating: An Experimental Study // Entropy. 2021. Vol. 23. № 2. P. 209. DOI: 10.3390/e23020209.

5. Alfaro G., Sanjuán M. A. F. Classification of cellular automata based on the Hamming distance // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2024. Т. 34. № 8. DOI: 10.1063/5.0227349.

6. Лобанов А. И. Модели клеточных автоматов // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2. № 3. С. 273–293. DOI: 10.20537/2076-7633-2010-2-3-273-293. URL: <https://crm.ics.org.ru/journal/article/1726> (дата обращения: 21.05.2026).

7. Матюшкин И. В. Клеточно-автоматные методы решения классических задач математической физики на гексагональной сетке. Ч. 1 // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9. № 2. С. 167–186. URL: <http://crm.ics.org.ru/journal/article/2554/> (дата обращения: 20.05.2026). DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-2-167-186.

8. Матюшкин И. В. Клеточно-автоматные методы решения классических задач математической физики на гексагональной сетке. Ч. 2 // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9. № 4. С. 547–566. URL: <http://crm.ics.org.ru/journal/article/2592/> (дата обращения: 20.05.2026). DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-4-547-566.

9. Матюшкин И. В., Заплетина М. А. Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11. № 1. С. 9–57. URL: <http://crm.ics.org.ru/journal/article/2764/> (дата обращения: 20.05.2026). DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-1-9-57.

10. Pomorski K., Kotula D. Thermodynamics in Stochastic Conway's Game of Life // Condens. Matter 2023. Vol. 8. № 2. P. 47. DOI: 10.3390/condmat8020047.

11. Алешкин А. С., Обухова А. Г., Жуков Д. О. Математическое и программное обеспечение стохастических клеточных автоматов с памятью // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13. № 2. С. 25–39. DOI: 10.25559/SITITO.2017.2.220.

12. Бандман О. Л. Режимы функционирования асинхронных клеточных автоматов, моделирующих нелинейную пространственную динамику // Прикладная дискретная математика. 2015. № 1 (27). С. 105–119. EDN: TOFAUV.

13. Клеммер П. С., Рави Кумар, Шебанов В. В. Исследование поведения стохастической энтропии в системе клеточного автомата 2d и 3d размерности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2026. № 2. С. 40–50. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13789> (дата обращения: 21.05.2026). DOI: 10.17513/mjpf.13789.

14. Саруханян С. К. Подход к численной оценке адекватности трехмерной клеточно-автоматной модели процесса диффузии вещества // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2025. Т. 50. № 1. С. 111–133. DOI: 10.26117/2079-6641-2025-50-1-111-133. EDN: BHWDOA.

15. Ершов Н. М., Попов А. М. Моделирование химических и биологических систем с помощью стохастических блочных клеточных автоматов с окрестностью Маркова // Computational nanotechnology. 2025. Т. 12. № 3. С. 31–40. DOI: 10.33693/2313-223X-2025-12-3-31-40.

16. Шебанов В. В. Исследование поведения стохастической энтропии системы клеточного автомата от исходной конфигурации распределения живых клеток // Исследования молодых ученых : материалы XCIV Междуна. науч. конф. (г. Казань, январь 2025 г.). Казань: Молодой ученый, 2025. С. 1–12. URL: <https://moluch.ru/conf/stud/archive/528/18816>. (дата обращения: 21.05.2026).

17. Шибков А. А., Кочегаров С. С., Компьютерное и физико-химическое моделирование эволюции фрактального коррозионного фронта, Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т. 13. № 1. С. 105–124. DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-1-105-124. URL: <https://crm.ics.org.ru/journal/article/3031> (дата обращения: 21.05.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ПОЛУЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА МЕДНО-ПЕКТИНОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Серикова Л. В., Худайбергенова Э. М., Ли С. П., Жоробекова Ш. Ж.

*Институт химии и фитотехнологий Национальной академии наук Киргизской Республики,
Бишкек, Киргизская Республика, e-mail: luda-0729@mail.ru*

Наночастицы различных металлов оказывают выраженное действие на микробные клетки, вызывая повреждения мембран, воздействуют на окислительные процессы, повреждая белки и ДНК. Наночастицы меди являются очень привлекательными материалами с точки зрения высокого потенциала применения в различных практических областях; включение металлов, обладающих улучшенной специфической поверхностью в наноразмерном состоянии, обеспечивает улучшение комплексообразующих свойств пектиновых материалов и, следовательно, повышает антимикробную и противораковую активность. Получение наночастиц меди представляет собой относительную сложность, поскольку они легко окисляются. Для получения медно-пектиновых наноконкомпозитов в настоящей работе был использован метод химического осаждения *in situ* или метод самосборки. Медно-пектиновые наноконкомпозиты были получены путем восстановления Cu(II) до Cu(0) с использованием гидразина и свеколовичного пектина. Состав и структура комплекса меди (II) с пектином были изучены с помощью элементного и рентгеноструктурного анализа, ИК-спектроскопии и ЭПР-спектроскопии, термогравиметрического анализа и ДСК-термического анализа. В спектрах поглощения УФ/видимого света полученных наночастиц меди присутствует характерный пик поглощения, появление этого пика указывает на восстановление ионов меди до металлических наночастиц. Присутствие карбоксильных групп и метилового эфира оказывает определяющее влияние на физико-химические свойства этих соединений, главным образом в плане комплексообразования и образования геля.

Ключевые слова: пектин, наноконкомпозиты, наночастицы, медь, металлокомплексы

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF COPPER-PECTIN NANOCOMPOSITES

Serikova L. V., Khudaibergenova E. M., Li S. P., Jorobekova Sh. J.

*Institute of Chemistry and Phytotechnologies of the National Academy of Sciences
of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, corresponding author: e-mail: luda-0729@mail.ru*

Nanoparticles of various metals have a pronounced effect on microbial cells, causing membrane damage and influencing oxidative processes, damaging proteins and DNA. Copper nanoparticles are highly attractive materials due to their high potential for application in various practical fields. The incorporation of metals with enhanced specific surface properties in the nanoscale state improves the complexing properties of pectin materials and, consequently, enhances antimicrobial and anticancer activity. The production of copper nanoparticles is relatively challenging because they are easily oxidized. In this study, copper-pectin nanocomposites were prepared using *in situ* chemical precipitation or self-assembly. Copper-pectin nanocomposites were obtained by reducing Cu(II) to Cu(0) using sugar beet pectin. The composition and structure of the copper (II) complex with pectin were studied using elemental and X-ray diffraction analysis, IR and EPR spectroscopy, thermogravimetric analysis, and differential scanning calorimetry (DSC) thermal analysis. The UV/visible light absorption spectra of the obtained copper nanoparticles show a characteristic absorption peak, the appearance of which indicates the reduction of copper ions to metallic nanoparticles. The presence of carboxyl groups and methyl ester has a decisive influence on the physicochemical properties of these compounds, primarily in terms of complexation and gel formation.

Keywords: pectin, nanocomposites, nanoparticles, copper, metal complexes

Введение

В последние годы особое внимание направлено на поиск новых путей синтеза, изучение физико-металлокомпозитных материалов [1; 2]. В качестве полимерного компонента этих композитов используют полисахариды, в частности пектины [3; 4]. Хорошая растворимость полисахаридов в воде является важным фактором для получения на их основе высокоэффективных биомедицинских препаратов [5; 6]. Установ-

лено, что комплексообразование пектинов с металлами повышает терапевтическую активность препаратов, снижает токсичность, усиливает иммунопотенцирующие свойства [7; 8].

Специфическими свойствами, которые открывают широкие возможности для создания и применения новых композиционных материалов в медицине, технике, сельском хозяйстве и других отраслях, обладают наночастицы меди [9].

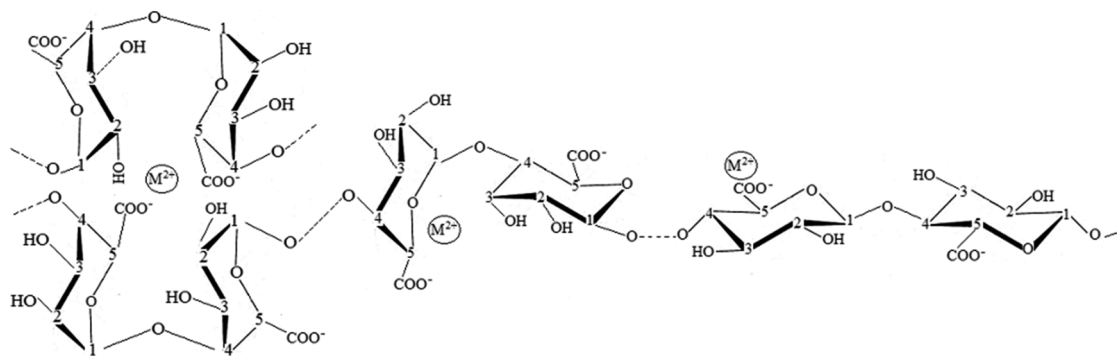


Рис. 1. Молекулярная структура полигалактуронатов металлов

Примечание: составлено авторами

Наночастицы меди могут быть получены на основе различных природных матриц и стабилизирующих агентов. Особенно важно, чтобы такие композиционные материалы сохраняли свою химическую и биологическую активность в течение длительного времени. Известно, что наночастицы меди обладают выраженными бактерицидными свойствами против различных типов организмов, такая антимикробная активность наночастиц по сравнению с солями меди обусловлена их уникальным свойством: большим соотношением площади поверхности к объему [10-12].

Кроме того, значительный интерес вызывает синтез металлических нульвалентных наночастиц в связи с их применением в различных областях, таких как оптика, электроника, магнитные материалы, катализ и биохимия [13; 14]. Размер и поверхностный заряд наночастиц определяют их взаимодействие с биологическими системами, включая абсорбцию, распределение, метаболизм и выведение [15].

В механизме гелеобразования при использовании пектина и его производных такие катионы, как ионы кальция, бария и меди, кооперативно взаимодействуют с блоками остатков G полигалактуроновой кислоты, образуя ионные поперечные связи между различными полимерными цепями. Последовательности полигалактуроната плотно упаковываются вместе с катионами, прочно координированными в полостях между цепями (рис. 1).

Цель настоящей работы – описание данных по получению двух образцов соединений меди с пектином: комплекс Cu-Пес (1) и комплекс пектина с частицами нульвалентной меди (Cu(0)/Пес-Н).

Материалы и методы исследования

Синтез комплекса Cu(II) с пектином. К 8,0 мл 25%-ного водного раствора пекто-

вой кислоты добавляли 10 мл водного раствора 0,01г $\text{CuCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Смесь перемешивали магнитной мешалкой при комнатной температуре в течение 0,5 ч. Затем добавляли 30% NaOH до достижения pH 10. Смесь перемешивали в течение 1 дня при 20°C, в результате чего образовывался синий осадок комплекса Cu(II)-пектин. Выход составил 60 мас.%. Содержание меди составляет 7,8%.

Протокол синтеза медно-пектиновых нанокомпозитов в присутствии гидразина. Систему нагревали до 90°C в течение 0,5 часа. Образовавшийся осадок отделяли центрифугированием при 12 000 об./мин. в вакууме. К комплексу Cu(II)-пектин по каплям добавляли 0,5% раствор NH_4OH для регулирования pH. Выпадение гидроксида меди (II) или оксидов меди не наблюдалось, поскольку pH был недостаточно высоким. После перемешивания раствора в течение 20 мин. при 40°C, при постоянном перемешивании добавляли концентрированный раствор N_2H_4 . Реакционную колбу помещали в водяную баню при 40°C на 30 минут, после чего частицы выдерживали в течение 2 часов при комнатной температуре.

Спектры поглощения ИК-спектроскопии регистрировались на ИК-спектрофотометре Specord 75 в диапазоне волновых чисел 200-4000 cm^{-1} с использованием образцов, приготовленных в виде таблеток KBr.

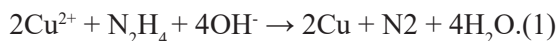
ЭПР-спектры регистрировались на спектрофотометре типа SE/X-2544 («Радиопан»). Измерения проводились в X-диапазоне на микрокристаллическом порошке при комнатной температуре с использованием DPPH в качестве стандарта.

Термогравиметрический (ТГА) и дифференциально-сканирующий калориметрический (ДСК) анализы проводились на термоанализаторе (STA 409C Luxx), соединенном с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aeolos (NETZSCH, Германия), в атмосфере азота при скорости нагрева 5 °C/мин.

Рентгено-дифракционный (XRD) анализ порошка проводился на дифрактометре Philips PW 1050 с использованием излучения CuK_α (λ 1,54184 Å).

Результаты исследования и их обсуждение

Металлические наночастицы меди получали в результате окислительно-восстановительной реакции, приведенной в уравнении, в основных условиях:



В ИК-спектрах комплексов меди (II) с пектином наблюдались полосы при 3400 и 2930 cm^{-1} , которые относятся к валентным колебаниям О-Н в полимерных соединениях и характерным колебаниям валентных колебаний С-Н, соответственно. Также наблюдались пики поглощения при 1425 и 1100 cm^{-1} вблизи области «отпечатков пальцев», которые представляют собой структурный фрагмент целлюлозы, присутствующей в спектре чистого пектина (рис. 2).

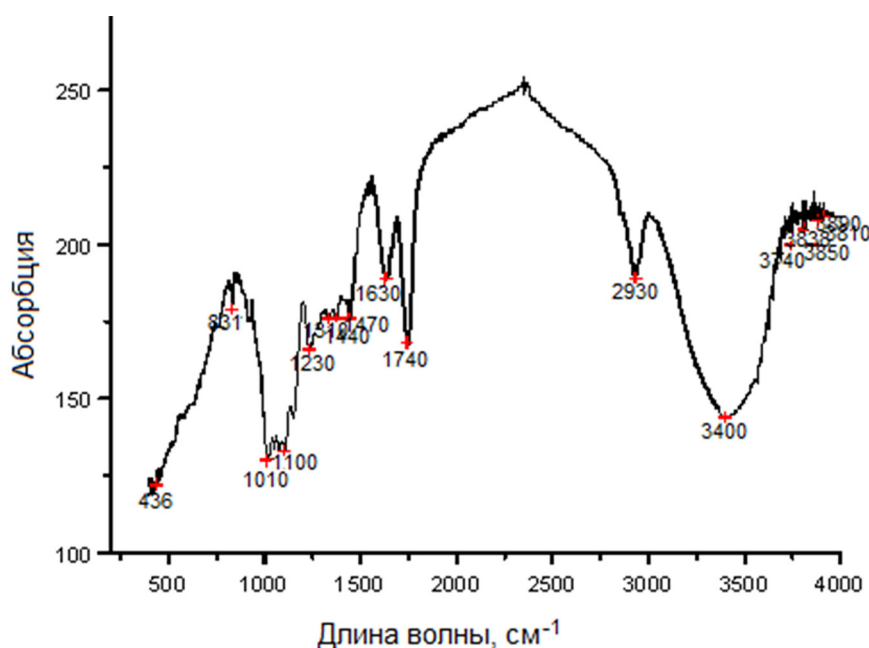


Рис. 2. ИК-спектр комплекса меди (II) с пектином
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

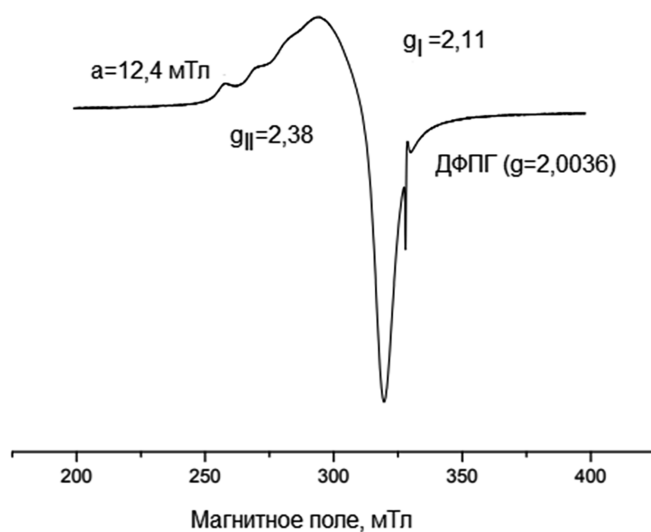


Рис. 3. Спектр ЭПР комплекса Cu(II) -пектин
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

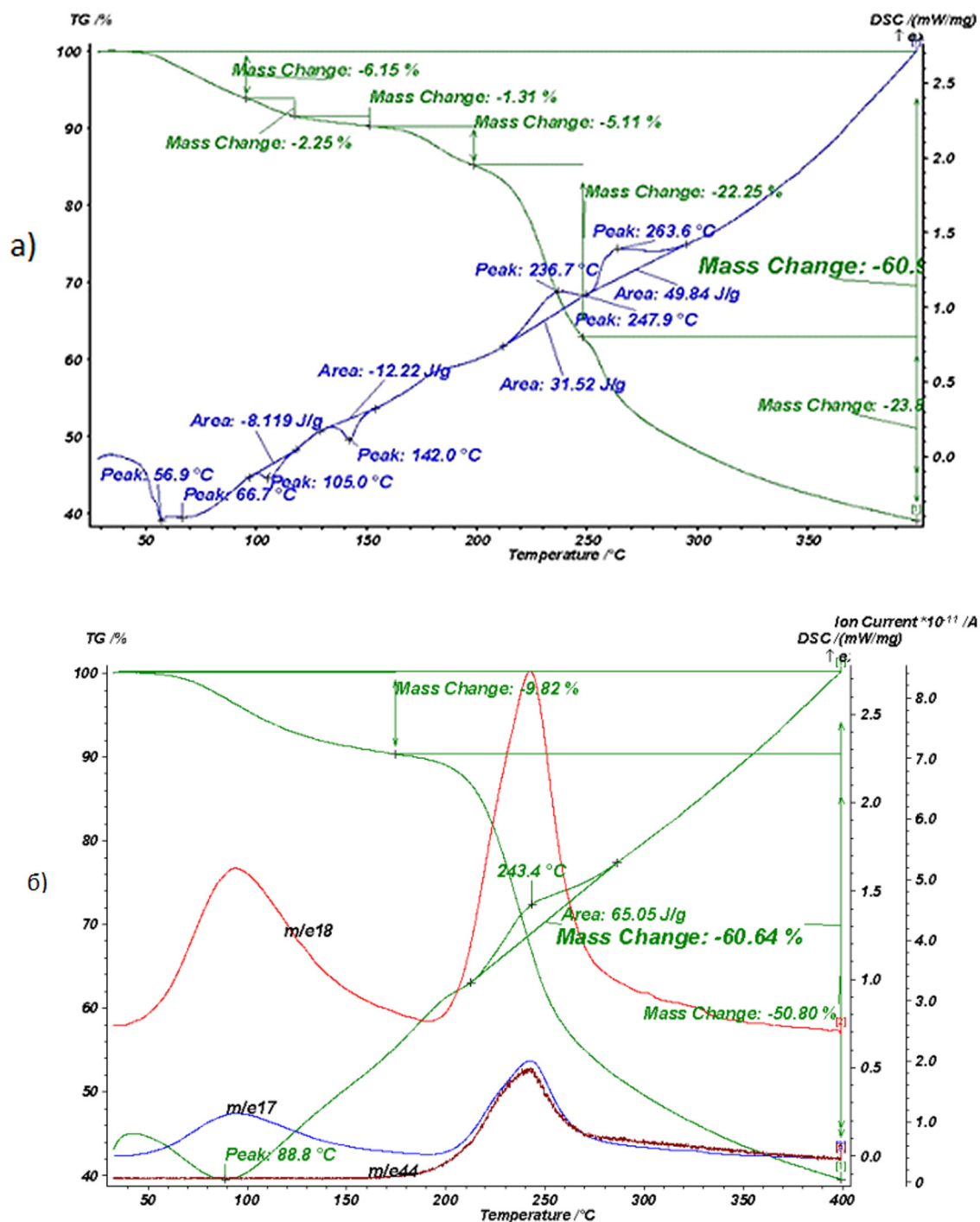


Рис. 4. Кривые ТГА-ДСК и масс-спектрометрии для пектина (а) и комплекса Cu(II)-пектин (б)
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Наблюдается сильный пик колебаний при 1740 см⁻¹, который представляет собой валентные колебания С=О метилового эфира и карбоновой кислоты в пектине, поскольку эти С=О и О-Н (3400 см⁻¹) участвуют в связывании Cu²⁺. В спектре также наблюдались симметричные и асим-

метричные валентные колебания групп COO⁻, расположенные при 1440, 1630 см⁻¹. Во всех природных пектинах некоторые карбоксильные группы находятся в форме метилового эфира. Для характеристики используемого пектина было определено общее количество карбоксильных групп (Kt),

количество свободных (K_{free}) и этерифицированных (K_{methoxy}) групп. Было установлено, что $K_t = 11,5$ мас.%, $K_{\text{free}} = 4,5$ мас.% и $K_{\text{methoxy}} = 7,8$ мас.%. Свободные карбоксильные группы составляют примерно 40% от общего количества. Пектин с высоким содержанием метоксильных групп. Такие пектины не так легко образуют гель в присутствии двухвалентных ионов из-за малого количества карбоксильных групп, которые необходимо связывать мостиками.

Спектроскопические исследования показали, что Cu(II) образует внутрисферный комплекс с октаэдрическим окружением с двумя группами COO^- пектина в аксиальном положении, а остальные положения координированы молекулами воды. В нашем исследовании это подтверждается спектроскопией ЭПР (рис. 3). Спектр напоминает типичный сигнал ЭПР Cu(II) со сверхтонкой структурой, возникающей из изолированных парамагнитных центров ($a = 12,4$ мТл). Спектр показывает пики, соответствующие $g_1 = 2,38$. Также присутствует пик асимметричной производной, соответствующий $g^* = 2,11$ при более высоком поле, указывающий на удлинение вдоль оси z .

Среднее значение $1,22 \times 10^{-3}$ моль Cu на грамм пектина было получено из элементного анализа. Это значение в сочетании с концентрацией, найденной методом кислотно-щелочного титрования ($1,90 \times 10^{-3}$ моль COO^- на грамм пектина), указывает на то, что 1 моль Cu(II) связан с двумя молями COO^- .

Результаты термогравиметрического и дифференциально-сканирующего калориметрического анализа комплекса Cu(II) -пектин показаны на рисунке 4.

Кривая ТГ показывает, что комплекс Cu(II) термически стабилен до 160°C . Потери массы 9,8% до этой температуры можно отнести к выделению воды при $T = 95^\circ\text{C}$, что указано масс-спектрами (m/e 18). При более высокой температуре, помимо элиминации координированной воды примерно при 240°C (второй пик в масс-спектрах), также наблюдаются органические потери с экзотермическим пиком при $243,4^\circ\text{C}$ ($65,05$ Дж/г) на кривой ДСК. За этим следует пиролиз карбоксилатного аниона, который соответствует потере массы диоксида углерода (m/e 44).

На рисунке 5 показаны типичные УФ-видимые спектры поглощения синтезированных пектин-медных наночастиц (Cu-Pec) и (Cu(0)/Pec-H), восстановленных гидразином. В спектрах поглощения медных наночастиц, полученных при восстановлении гидразином, присутствует пик поглощения в области $\lambda = 593$ нм. Этот пик поглощения относится к возбуждению плазмонного резонанса или межзонного перехода, что является характерным свойством металлической природы медных наночастиц. Появление этого пика поглощения указывает на восстановление ионов меди до медных наночастиц под воздействием гидразина. Следует также отметить, что при добавлении раствора гидразингидрата к реакционной смеси наблюдалось изменение цвета с синего на красновато-коричневый. При этом зеленоватый цвет, характерный для наночастиц оксидов меди (I) и меди (II), отсутствовал, что дополнительно указывает на то, что растворы содержали чистые наночастицы меди.

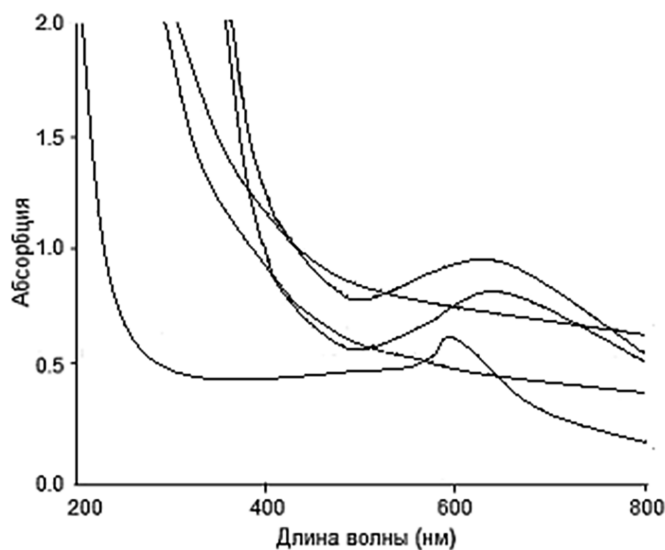


Рис. 5. Изменение спектра УФ-видимого-ИК-излучения при образовании нульвалентной меди путем восстановления ионов Cu^{2+} гидразином при 50°C

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

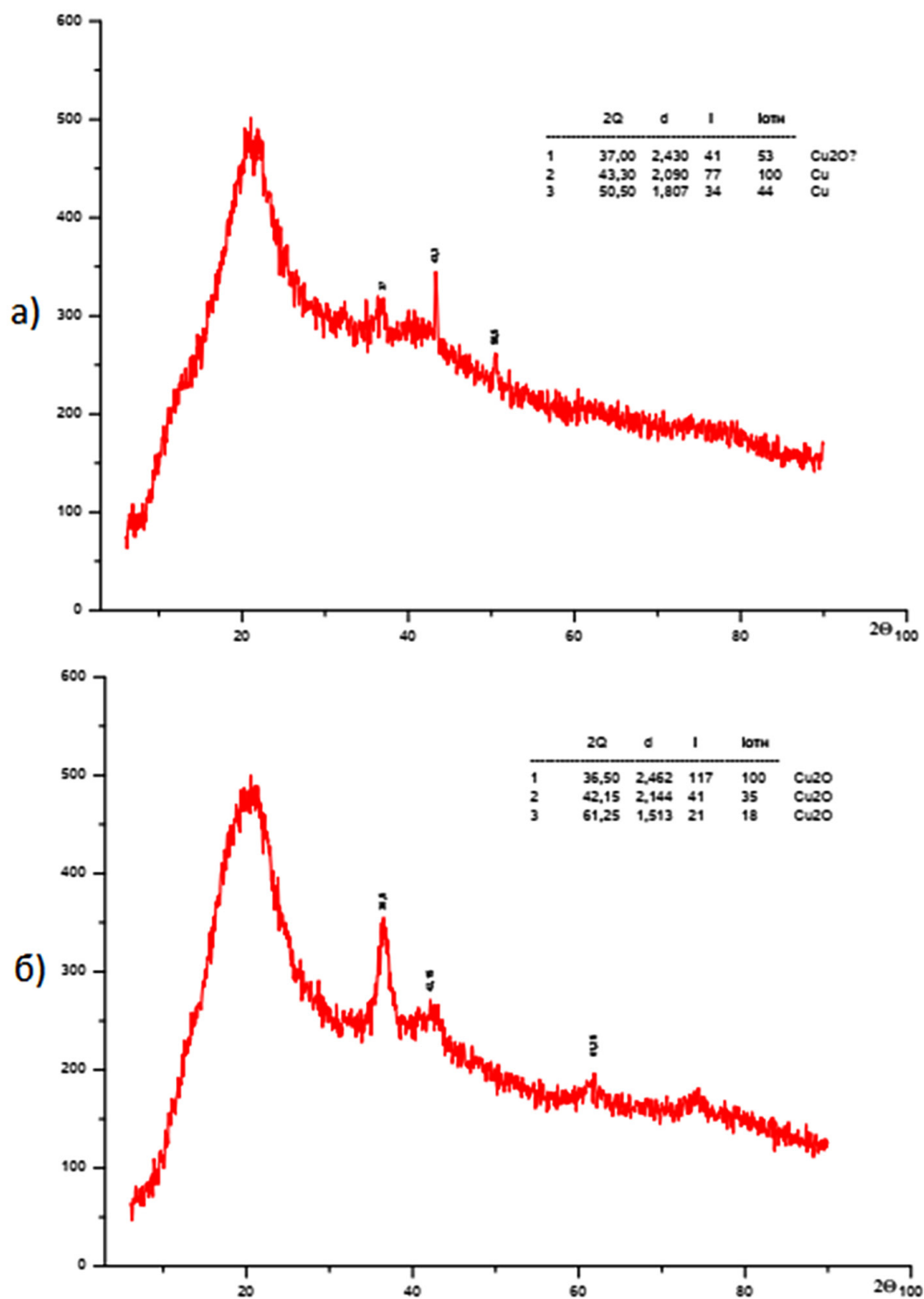


Рис. 6. Рентгенограммы дифракции (XRD) наночастиц меди, стабилизированных пектином:
 а) продукт, выделенный в вакууме; б) продукт, выделенный осаждением этанолом
 Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

На рентгенограмме (XRD) наночастиц меди (рис. 6), стабилизированных пектином и выделенных в вакууме, отсутствуют дифракционные пики, вызванные окисленными

атомами меди, а наночастицы, выделенные осаждением этанолом, характеризуются появлением дополнительных пиков, отвечающие наночастицам Cu_2O .

Заключение

Были синтезированы два образца медь-содержащих пектиновых композиций, включающая комплекс Cu(II) с пектином и композит нульвалентной меди с пектином. Композиты были охарактеризованы по составу и структуре с использованием различных методов анализа. Рентгенофазовое исследование нанокомпозитов Cu(0)/Пес(Н) показало, что включение металлов в полимерную структуру пектина вызывает изменения формы дифрактограмм. Межплоскостные расстояния линий на исследованных дифрактограммах нанокомпозитов указывают на нулевое валентное состояние металлов.

Список литературы

1. Maxwell E. G., Colquhoun I. J., Chau H. K., Hotchkiss A. T., Waldron K. W., Morris V. J., Belshaw N. J. Modified sugar beet pectin induces apoptosis of colon cancer cells via an interaction with the neutral sugar side-chains // *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 136. P. 923-929. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.09.063.
2. Fang T., Liu D. D., Ning H. M., Dan L., Sun J. Y., Huang X. J., Dong Y., Geng M. Y., Yun S. F., Yan J., Huang R. M. Modified citrus pectin inhibited bladder tumor growth through downregulation of galectin-3 // *Acta Pharmacol Sin*. 2018. № 39(12). P. 1885-1893. DOI: 10.1038/s41401-018-0004-z.
3. Mei X., Yi C., Huang G. Preparation methods and antioxidant activities of polysaccharides and their derivatives // *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*. 2017. Vol. 17. № 10. P. 863-868. DOI: 10.2174/1389557517666170116114657.
4. Wang R., Liang R., Dai T., Chen J., Shuai X., Liu C. Pectin-based adsorbents for heavy metal ions: A review // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 91. P. 319-329. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.07.033.
5. Hassan E. A., Abou Elseoud W. S., Abo-Elfadl M. T., Hassan M. L. New pectin derivatives with antimicrobial and emulsification properties via complexation with metal-terpyridines // *Carbohydrate Polymers*. 2021. Vol. 268. Article 118230. DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.118230.
6. Kudaibergenova I., Zhorobekova S., Sitnikova Y., Serikova L., Kylchykbaev A., Chakeyev I., Prokhorenko V., Duvvuri S. P., Meduri K. Ch., Vityala Y. Enhancing the efficacy of radiation therapy and chemotherapy in cancer treatment with modified citrus pectin and metformin // *Asian Journal of Pharmaceutics*. Jan-Mar 2024. Vol. 18 (1). P. 200-204. DOI: 10.22377/ajp.v18i01.5280.

nal of Pharmaceutics. Jan-Mar 2024. Vol. 18 (1). P. 200-204. DOI: 10.22377/ajp.v18i01.5280.

7. Kapoor S., Dharmesh S. M. Pectic Oligosaccharide from tomato exhibiting anticancer potential on a gastric cancer cell line: Structure-function relationship // *Carbohydrate Polymers*. 2017. Vol. 160. P. 52-61. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.12.046.
8. Ai L., Chung Y. C., Lin S. Y., Lee K. C., Lai P. F. H., Xia Y., Wang G., Cui S. W. Active pectin fragments of high in vitro antiproliferation activities toward human colon adenocarcinoma cells: Rhamnogalacturonan II // *Food Hydrocolloids*. 2018. Vol. 83. P. 239-245. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.05.017.
9. Liang X., Shi L., Zhang R., Zhang M. Pectin mediated green synthesis of CuO nanoparticles: evaluation of its cytotoxicity, antioxidant and anti-human cervical cancer properties // *Journal of Experimental Nanoscience*. 2022. Vol. 17. № 1. P. 315-325. DOI: 10.1080/17458080.2021.2013470/
10. Pei-jun Li., Jin-ye Liang., Dong-lin Su., Ying Huang, Jiang-juan Pan, Ming-fang Peng, Gao-yang Li, Yang Shan. Green and efficient biosynthesis of pectin-based copper nanoparticles and their antimicrobial activities // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 43. P. 2017-2026. DOI: 10.1007/s00449-020-02390-w.
11. Nguyen T. D., Nguyen H. T., Phung H. T. et al. Investigating the antifungal activity of the pectin-stabilized copper nanoparticles against *Fusarium solani* and *Rhizoctonia solani* // *Int. J. Environ. Sci. Technol*. 2025. Vol. 22. P. 1497-1510. DOI: 10.1007/s13762-024-05737-y.
12. Shahrzad Zirak Hassan Kiadeh, Azadeh Ghatee, Mehdi Farokhi, Jhamak Nourmohammadi, Addie Bahi, Frank K. Ko. Electrospun pectin/modified copper-based metal-organic framework (MOF) nanofibers as a drug delivery system // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. Vol. 173. P. 351-365. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.01.058.
13. Kenzheyeva A. M., Zharmagambetova A. K., Talgatov E. T., Zamanbekova A. T., Jumekeyeva A. I., Auyezkhanova A. S., Myltykbayeva Z. K., Koca A. Effect of Pectin and Copper Modification on the Performance of Pd/ZnO Catalyst in Liquid-Phase Hydrogenation and Photocatalytic Hydrogen Evolution. // *Molecules*. 2025. Vol. 30. Is. 18. 3806. DOI: 10.3390/molecules30183806.
14. Ismail N., Shameli K., Che W. N., Ali R. R. Effect of size and shape dependent of synthesized copper nanoparticle using natural honey // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 808 (1). 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/808/1/012033.
15. Самадун А. И., Таусарова Б. Р., Набиева Ж. С., Дарибаева Г. Т. Разработка антимикробных упаковочных материалов для пищевых продуктов на основе наночастиц меди // *Вестник КазУТБ*. 2024. Т. 3. № 24. DOI: 10.58805/kazutb.v.3.24-304.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.