

Умная упаковка: интеграция IoT и датчиков для контроля качества пищевых продуктов

Сергей М. Махов¹ makhovsm@gmail.com  0009-0001-9626-4689

¹ МГУТУ им. Разумовского, ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва, 109004, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к созданию и применению умной упаковки для пищевых продуктов, объединяющей сенсорные технологии и Интернет вещей (IoT). Отмечается, что традиционная упаковка обеспечивает лишь механическую защиту, а умная упаковка позволяет отслеживать фактическое состояние продукции на всех этапах производства и логистики. Приведены примеры сенсоров, используемых в таких решениях: газовые индикаторы (O₂, CO₂, NH₃, H₂S), температурные и влажностные датчики, RFID/NFC метки, а также беспроводные протоколы связи (BLE, LoRaWAN, NB-IoT). Отдельное внимание уделяется интеграции химических и биосенсоров, позволяющих фиксировать патогены и метаболиты разложения. Рассмотрены примеры промышленных решений (NFC-метки для контроля шпината, IoT-платформа Wiliot, QR-коды Sealed Air), а также перспективы применения наноматериалов и биоразлагаемых композитов. Обсуждаются вопросы безопасности, энергоэффективности, стандартизации и утилизации электроники в упаковке. Отмечается, что несмотря на высокую стоимость и сложность внедрения, умная упаковка обладает значительным потенциалом для повышения прозрачности цепочек поставок, продления сроков годности, сокращения пищевых отходов и усиления взаимодействия с потребителем. Перспективными направлениями развития являются внедрение энергонезависимых сенсоров, стандартизация обмена данными и интеграция с искусственным интеллектом и блокчейн-платформами.

Ключевые слова: умная упаковка; Интернет вещей; датчики качества; мониторинг свежести; RFID/NFC; безопасность данных; прослеживаемость; устойчивость.

Smart packaging: integration of It and sensors for food quality control

Sergey M. Makhov¹ makhovsm@gmail.com  0009-0001-9626-4689

¹ Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, 73 Zemlyanoy Val Street, Moscow, 109004, Russia

Abstract. The article discusses modern approaches to the development and application of smart packaging for food products, which integrates sensor technologies and the Internet of Things (IoT). While conventional packaging provides only mechanical protection, smart packaging enables monitoring of the actual condition of products at all stages of production and logistics. Examples of sensors used in such systems are presented, including gas indicators (O₂, CO₂, NH₃, H₂S), temperature and humidity sensors, RFID/NFC tags, as well as wireless communication protocols (BLE, LoRaWAN, NB-IoT). Particular attention is given to the integration of chemical and biosensors capable of detecting pathogens and decomposition metabolites. Industrial case studies are reviewed, such as NFC tags for spinach freshness monitoring, the Wiliot IoT platform, and Sealed Air's QR code solutions, along with prospects for nanomaterials and biodegradable composites. Issues of data security, energy efficiency, standardization, and electronics disposal are analyzed. It is noted that despite high costs and integration challenges, smart packaging has considerable potential to enhance supply chain transparency, extend shelf life, reduce food waste, and improve consumer engagement. Promising directions include the development of energy-autonomous sensors, unification of data exchange standards, and integration with artificial intelligence and blockchain platforms.

Keywords: smart packaging; Internet of Things; quality sensors; freshness monitoring; RFID/NFC; data security; traceability; sustainability.

Введение

Контроль качества пищевых продуктов на всех этапах производства и логистики является ключевым фактором пищевой безопасности и сокращения потерь. По оценкам FAO, около 14% всего продовольствия «теряется» ещё до появления на полках магазинов [1]. Традиционная упаковка обеспечивает механическую защиту продукта, но не даёт оперативной информации о его фактическом состоянии. В этих условиях умная упаковка – объединяющая датчики,

беспроводную связь и аналитику – обещает повысить прозрачность цепочек поставок, сократить риски порчи и улучшить «отслеживаемость» [2].

Результаты и обсуждение

В умной упаковке применяются различные виды сенсоров и меток.

- Газовые индикаторы и датчики отслеживают состав газовой среды внутри упаковки.

Для цитирования

Махов С.М. Умная упаковка: интеграция IoT и датчиков для контроля качества пищевых продуктов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 46–50. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-46-50

For citation

Makhov S.M. Smart packaging: integration of It and sensors for food quality control. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 46–50. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-46-50

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Чаще всего используются индикаторы кислорода и углекислого газа, которые меняют цвет при нарушении герметичности или при микробиологическом разложении [3]. Так, для индикации кислорода применяют красители (например, метиленовый синий), меняющие окраску при насыщении кислородом [4]. Новые разработки включают печатные полупроводниковые сенсоры, чувствительные к CO_2 , NH_3 , H_2S и другим газам.

- Температурные и влажностные сенсоры – т. е. цифровые термисторы и гигрометры – контролируют условия хранения. Нарушение температурного режима (особенно для скоропортящейся продукции) критично, поэтому широко используются индикаторы «время–температура» (ТТИ) – химические или биологические метки, изменяющие цвет в зависимости от накопленного теплового воздействия [5]. Такие ТТИ-индикаторы просты в использовании и позволяют фиксировать изначальный температурный профиль продукта. Также датчики влажности и уровня кислорода в упаковке помогают следить за окружающей средой продукта [6], что является важным для оценки условий хранения.

- RFID-метки и метки NFC (радиометки с идентификаторами) позволяют автоматически фиксировать упаковку на этапах логистики и при необходимости измерять внутренние параметры. Пассивные RFID-метки не требуют батареек и могут оснащаться датчиками температуры, влажности и целостности упаковки [7]. Безчиповые RFID-метки обещают дальнейшее удешевление решений – но пока они ограничены дальностью сигнала и сложности его обработки [8]. Метки NFC (Near-Field Communication) активируются при сканировании смартфоном и передают сведения о свежести или дате производства продукта напрямую потребителю.

- Bluetooth Low Energy и LPWAN (т. е. более энергоёмкие протоколы) применяются в упаковке реже. Однако BLE-метки встречаются в «умных» бутылках или контейнерах с едой (например, со встроенным аккумулятором). Для мониторинга крупных партий на складах используют технологии дальнего радиуса действия – LoRaWAN [9] или NB-IoT (сотовые IoT), позволяющие отправлять показания раз в несколько часов без риска быстрой разрядки.

Наконец, помимо сенсоров, в упаковке могут быть и другие элементы – например, кислородо-поглотители химически удаляют избыточный кислород из коробки и замедляют окисление продуктов; в свою очередь этиленовые бенты нейтрализуют парниковый газ этилен и замедляют созревание фруктов [10].

Такие технологии продлевают срок годности; при этом они требуют особого учёта в системе мониторинга [11].

Уровни типичного IoT-решения для умной упаковки отображены на Рисунке 1.

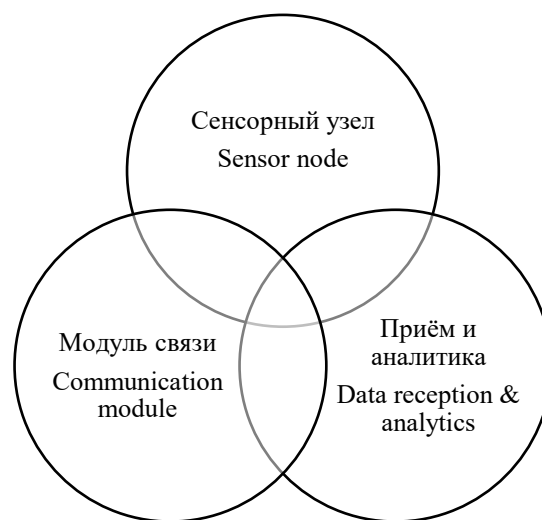


Рисунок 1. Уровни типичного IoT-решения для умной упаковки

Figure 1. Layers of a typical IoT solution for smart packaging

Устройство включает датчики (газ, температура, влажность, pH и др.), микроконтроллер (или специализированный IoT-чип) и источник энергии. Современные разработки демонстрируют автономные «пиксели» Ambient IoT – очень компактные NFC/BLE-метки с интегрированными сенсорами и антенной, которые питаются от радиоволн или света [12]. Такие метки могут крепиться к упаковке и автоматически передавать сигналы при приближении считывателя.

В устройстве предусмотрен передатчик: RFID/NFC-антенна, Bluetooth-модуль или LPWAN-трансивер. Датчики конфигурируются на периодическую или пороговую отправку данных. Популярные протоколы – MQTT, HTTP(S), CoAP – используются для передачи на облачный сервер. Например, специальные IoT-шлюзы на базе LoRaWAN собирают температуру множества меток на складе и пересылают их в облако для анализа.

Данные с сенсоров поступают на централизованный сервер или облачную платформу, где хранятся в базе и обрабатываются. В данном случае задействуются панели мониторинга и мобильные приложения. При отклонении от заданных параметров (например, превышение допустимой температуры) система мгновенно уведомляет ответственных сотрудников и фиксирует произошедшее [13]. Большие объёмы данных позволяют применять методы машинного обучения для прогноза «просрочки» (прогноз сроков годности) и оптимизации логистики.

Теперь рассмотрим примеры научных и промышленных решений. Группа исследователей из Империял Колледжа (Лондон) разработала одноразовый NFC-тег с бумажным газовым сенсором для контроля порчи упакованного шпината [14]. Сенсор, напечатанный углеродной пастой, менял электропроводность при изменении газового состава, а встроенная NFC-антенна передавала результат на смартфон. В экспериментах устройство успешно различало свежую и испорченную продукцию, а стоимость тега составила около \$0.35 – это сделало его практически безотходным решением для мониторинга сроков годности [14]. Исследование А. Соббана и др. показывает, что сочетание биосенсоров и IoT обеспечивает непрерывный контроль упаковки [13]. Биочувствительные датчики определяют патогены и метаболиты разложения (например, бактерии, токсины или изменения pH), а IoT-сети (Wi-Fi, BLE, 5G, NFC) передают эти данные в реальном времени всем участникам цепочки поставок [14]. Авторы отмечают перспективы новых наноматериалов (графен, MXene, биоразлагаемые композиты) и их будущую роль в создании сверхчувствительных и экологических сенсоров.

Исследователи также описывают применение RFID-меток для мониторинга температуры, влажности, pH и целостности упаковки [7]. Такие метки обеспечивают недорогое и энергоэффективное решение, особенно в логистике; позволяют считывать параметры без физического контакта. В перспективе безчиповые RFID-системы должны ещё больше удешевить технологию, хотя сейчас их ограничивают дальность работы, множественность сигналов при большом числе меток и необходимость соблюдения единых стандартов безопасности [7]. На рынке также уже имеются коммерческие платформы умной упаковки. Стартап Wiliot из США уже выпускает «IoT-пиксели» – крошечные автономные BLE-метки без батареи, которые прикрепляются к упаковке и передают данные о температуре и местоположении по радиоканалу [12]. Производители продуктов питания тестируют такие метки для контроля инвентаризации.

Стоит также рассмотреть пример компании Sealed Air (также из США), которая использует цифровую печать уникальных QR-кодов на каждой упаковке [15]. Такие коды распознаются специальными приложениями или IoT-устройствами и содержат в себе ссылку на веб-портал с информацией о продукте (происхождение, состав, экологические сертификаты, рецепты). Например, покупатель может сканировать код и увидеть полную историю партии товара – фактически «от фермы до магазина» [15]. Стартап Tapkit из Великобритании предлагает пользователям

динамические QR-коды – т.е. после печати упаковки ссылка, зашифрованная в коде, может обновляться; тем самым она позволяет изменять контент (рецепты, акции) без перепечатывания этикеток [16]. Такая упаковка превращается в канал взаимодействия с потребителем, предоставляя актуальную информацию и усиливая лояльность.

Отдельно необходимо рассмотреть вопросы безопасности, стандартизации, энергоэффективности и устойчивости. Во-первых, умные упаковки генерируют объёмы информации о происхождении и условиях хранения продукта – поэтому необходимы надёжные средства защиты: каналы связи должны быть зашифрованы (TLS/SSL), а доступ – аутентифицирован [17]. А. Соббан и его коллеги утверждают следующее – без надёжного шифрования и средств аутентификации невозможно гарантировать конфиденциальность и целостность данных, поступающих из сенсоров [13]. Технологии блокчейна рассматриваются для создания учёта всех событий в цепочке поставок. Стоит также отметить, что на данный момент решения разрознены – не существует единого стандарта взаимодействия разных датчиков и систем. Однако набирают силу глобальные стандарты – например, GS1 Digital Link позволяет закодировать в одном QR-коде ссылку на веб-ресурс с информацией о товаре (описание, срок годности, состав, пищевая ценность и т. д.) [18]. На наш взгляд, распространение подобных стандартов (GS1, MQTT, EPC) в будущем упростит интеграцию устройств разных производителей.

Далее рассмотрим встраивание источников питания в одноразовую упаковку, которое является сложным из-за высокой стоимости и ряда экологических рисков. Поэтому специалисты стараются предложить различные альтернативы – например, RF-энергохарвестинг или суперконденсаторы. Так, некоторые NFC-метки оснащаются микросоляром или же являются ориентированными на сбор «световой энергии» [12]. Также системы оптимизируют процессы – например, данные передаются не постоянно, а при появлении аномалий или по расписанию. Наконец, наличие электроники в упаковке ставит задачу утилизации. Применение биоразлагаемых и нетоксичных материалов (целлюлоза, белковые полимеры, графен) в перспективе может уменьшить экологический след таких систем [13, 19]. Одновременно «умная» упаковка сама по себе способствует устойчивости: она помогает сократить пищевые отходы (за счёт продления срока годности и лучшего контроля качества) и оптимизировать логистику. Например, отмечено, что за счёт продления свежести товаров и перераспределения продуктов с истекающим сроком годности объём пищевых отходов заметно снижается [20].

Основные ограничения для широкого внедрения умной упаковки – это стоимость и сложность интеграции. Цены на сенсоры и метки действительно падают – но внедрение даже простого ТТ-датчика или NFC-метки увеличивает себестоимость упаковки. При этом также необходимо перестраивать логистические процессы и обучать персонал работе с новыми данными. Также существует риск недоверия потребителей – часть из них может опасаться слежки или утечки данных, поэтому специалистам индустрии важно обеспечить прозрачность информации. При этом стоит отметить, что перспективы технологии действительно огромны – так, внедрение энергонезависимых технологий (Ambient IoT) и стандартизованных протоколов (6LoWPAN, MQTT) смогут сделать умную упаковку более подходящей для повсеместного использования. Интеграция с AI и блокчейн-платформами позволит строить открытые реестры качества продуктов. Также ожидается появление автономных адаптивных упаковок, которые информируют потребителя и специалиста о состоянии продукта и динамически меняют

условия хранения (например, при необходимости активируют поглотители газов).

Заключение

Технологии умной упаковки объединяют сенсорные решения и Интернет вещей с целью непрерывного мониторинга качества пищевых продуктов. Современные подходы – химические индикаторы, беспроводные сенсорные метки и др. – позволяют повысить безопасность, сократить потери продукции и усилить «отслеживаемость». Опыт научных и промышленных проектов показывает эффективность таких систем – они помогают вовремя выявить отклонения условий хранения и предупредить риски потери качества. При этом не стоит забывать, что нерешенными остаются задачи энергоснабжения, стандартов и стоимости, которые требуют дальнейших тщательных исследований. Перспективные направления дальнейших исследований, следовательно, включают в себя разработки энергонезависимых сенсоров, унификацию стандартов обмена данными и расширенное взаимодействие упаковки с искусственным интеллектом.

Литература

- 1 Mkhari T., Adeyemi J.O., Fawole O.A. Recent advances in the fabrication of intelligent packaging for food preservation: a review // *Processes*. 2024. Vol. 13. No. 2. P. 539. DOI: 10.3390/pr13020539.
- 2 Realini C.E., Marcos B. Active and intelligent packaging systems for a modern society // *Meat science*. 2014. Vol. 98. No. 3. P. 404–419.
- 3 Biji K.B. et al. Smart packaging systems for food applications: a review // *Journal of food science and technology*. 2015. Vol. 52. No. 10. P. 6125–6135.
- 4 Mills A. Oxygen indicators and intelligent inks for packaging food // *Chemical Society Reviews*. 2005. Vol. 34. No. 12. P. 1003–1011.
- 5 Taoukis P.S. Modelling the use of time-temperature // *Food process modelling*. 2001. Vol. 59. P. 402.
- 6 Fathima M. How smart packaging sensors safeguard foods and drugs // *Packaging Digest*. 2017. 13 Apr. URL: <https://www.packagingdigest.com/food-packaging/how-smart-packaging-sensors-safeguard-foods-and-drugs> (дата обращения: 11.05.2025).
- 7 Zuo J., Feng J., Gameiro M.G. et al. RFID-based sensing in smart packaging for food applications: a review // *Future Foods*. 2022. Vol. 6. Art. No. 100198. DOI: 10.1016/j.fufo.2022.100198.
- 8 Preradovic S., Karmakar N.C. Chipless RFID: Bar code of the future // *IEEE microwave magazine*. 2010. Vol. 11. No. 7. P. 87–97.
- 9 Jedermann R. et al. Testing Lora for food applications-Example application for airflow measurements inside cooled warehouses with apples // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 24. P. 284–289.
- 10 Wei H. et al. Ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables: A review // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 337. P. 127750.
- 11 Vermeiren L. et al. Developments in the active packaging of foods // *Trends in food science & technology*. 1999. Vol. 10. No. 3. P. 77–86.
- 12 Jenns C. Wiliot launches IoT platform for packaging [Электронный ресурс] // *Packaging Gateway*. 2024. 12 Jan. URL: <https://www.packaging-gateway.com/news/wiliot-iot-platform-packaging> (дата обращения: 11.05.2025).
- 13 Sobhan A., Hossain A., Wei L. et al. IoT-enabled biosensors in food packaging: a breakthrough in food safety for monitoring risks in real time // *Foods*. 2025. Vol. 14. No. 8. P. 1403. DOI: 10.3390/foods14081403.
- 14 Naik A., Goswami J.K., Bagchi M. et al. Smart packaging with disposable NFC-enabled wireless gas sensors for monitoring food spoilage // *ACS Sensors*. 2024. DOI: 10.1021/acssensors.4c02510.
- 15 Как связаны Интернет вещей и свежие продукты в вашем магазине? [Электронный ресурс] // МКА.ру. 2020. 29 апр. URL: <https://www.mka.ru/categories/84/18217> (дата обращения: 11.05.2025).
- 16 Top 7 Smart Packaging Examples in 2023 & 2024 [Электронный ресурс] // *StartUs Insights*. 2024. URL: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/smart-packaging-startups> (дата обращения: 11.05.2025).
- 17 McKay K., Cooper D. Guidelines for the selection, configuration, and use of transport layer security (TLS) implementations. National Institute of Standards and Technology, 2017. No. NIST Special Publication (SP) 800–52 Rev. 2 (Draft).

- 18 GS1 US. GS1 Digital Link Proof of Concept (Whitepaper) [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://documents.gs1us.org/adobe/assets/.../GS1-Digital-Link-POC-Whitepaper.pdf> (дата обращения: 11.05.2025).
- 19 Irimia-Vladu M. "Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future // Chemical Society Reviews. 2014. Vol. 43. No. 2. P. 588–610.
- 20 How Smart Packaging Enhances Sustainability and Consumer Engagement [Электронный ресурс] // bl.ink Blog. 2022. URL: <https://www.bl.ink/blog/how-smart-packaging-enhances-sustainability-and-consumer-engagement> (дата обращения: 11.05.2025).

References

- 1 Mkhari T., Adeyemi J.O., Fawole O.A. Recent advances in the fabrication of intelligent packaging for food preservation: a review. Processes. 2024. vol. 13. no. 2. p. 539. doi: 10.3390/pr13020539
- 2 Realini C.E., Marcos B. Active and intelligent packaging systems for a modern society. Meat Science. 2014. vol. 98. no. 3. pp. 404–419. doi: 10.1016/j.meatsci.2014.06.028
- 3 Biji K.B., Ravishankar C.N., Mohan C.O., Gopal T.K.S. Smart packaging systems for food applications: a review. Journal of Food Science and Technology. 2015. vol. 52. no. 10. pp. 6125–6135. doi: 10.1007/s13197-015-1766-7
- 4 Mills A. Oxygen indicators and intelligent inks for packaging food. Chemical Society Reviews. 2005. vol. 34. no. 12. pp. 1003–1011. doi: 10.1039/b303997p
- 5 Taoukis P.S. Modelling the use of time–temperature. Food Process Modelling. 2001. vol. 59. p. 402. doi: 10.1533/9781855736313.3.402
- 6 Fathima M. How smart packaging sensors safeguard foods and drugs. Packaging Digest. 2017. 13 Apr. URL: <https://www.packagingdigest.com/food-packaging/how-smart-packaging-sensors-safeguard-foods-and-drugs> (in Russian)
- 7 Zuo J., Feng J., Gameiro M.G. et al. RFID-based sensing in smart packaging for food applications: a review. Future Foods. 2022. vol. 6. article no. 100198. doi: 10.1016/j.fufo.2022.100198
- 8 Preradovic S., Karmakar N.C. Chipless RFID: bar code of the future. IEEE Microwave Magazine. 2010. vol. 11. no. 7. pp. 87–97. doi:10.1109/MMM.2010.938571
- 9 Jedermann R. et al. Testing LoRa for food applications – example application for airflow measurements inside cooled warehouses with apples. Procedia Manufacturing. 2018. vol. 24. pp. 284–289. doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.043
- 10 Wei H. et al. Ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables: a review. Food Chemistry. 2021. vol. 337. p. 127750. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127750
- 11 Vermeiren L., Devlieghere F., van Beest M., de Kruijf N., Debevere J. Developments in the active packaging of foods. Trends in Food Science & Technology. 1999. vol. 10. no. 3. pp. 77–86. doi: 10.1016/S0924-2244(99)00032-1
- 12 Jenns C. Wiliot launches IoT platform for packaging. Packaging Gateway. 2024. 12 Jan. URL: <https://www.packaging-gateway.com/news/wiliot-iot-platform-packaging> (in Russian)
- 13 Sobhan A., Hossain A., Wei L. et al. IoT-enabled biosensors in food packaging: a breakthrough in food safety for monitoring risks in real time. Foods. 2025. vol. 14. no. 8. p. 1403. doi:10.3390/foods14081403
- 14 Naik A., Goswami J.K., Bagchi M. et al. Smart packaging with disposable NFC-enabled wireless gas sensors for monitoring food spoilage. ACS Sensors. 2024. doi:10.1021/acssensors.4c02510
- 15 How are the Internet of Things and fresh products in your store connected? MKA.ru. 2020. 29 Apr. URL: <https://www.mka.ru/categories/84/18217> (in Russian)
- 16 Top 7 Smart Packaging Examples in 2023 & 2024. StartUs Insights. 2024. URL: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/smart-packaging-startups> (in Russian)
- 17 McKay K., Cooper D. Guidelines for the selection, configuration, and use of transport layer security (TLS) implementations. National Institute of Standards and Technology, 2017. NIST Special Publication (SP) 800–52 Rev. 2 (Draft)
- 18 GS1 US. GS1 Digital Link Proof of Concept (Whitepaper). 2019. URL: <https://documents.gs1us.org/adobe/assets/.../GS1-Digital-Link-POC-Whitepaper.pdf> (in Russian)
- 19 Irimia-Vladu M. "Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future. Chemical Society Reviews. 2014. vol. 43. no. 2. pp. 588–610. doi:10.1039/C3CS60235D
- 20 How Smart Packaging Enhances Sustainability and Consumer Engagement. bl.ink Blog. 2022. URL: <https://www.bl.ink/blog/how-smart-packaging-enhances-sustainability-and-consumer-engagement> (in Russian)

Сведения об авторах

Сергей М. Махов аспирант, кафедра биологии и биоинформатики, МГУТУ им. Разумовского, Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, makhovsm@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-9626-4689>

Information about authors

Sergey M. Makhov 3rd-year PhD student, Department of Biology and Bioinformatics, Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Zemlyanoy Val, 73, Moscow, 109004, Russia, makhovsm@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-9626-4689>

Вклад авторов

Сергей М. Махов Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

Sergey M. Makhov All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2026
Received 01/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2026