

Сравнительная оценка эффективности схем иммунопрофилактики кори методами агент-ориентированного моделирования

А. А. Поздняков*

ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

Резюме

Актуальность. Достижение и поддержание устойчивого контроля над корью требует оптимизации календаря вакцинации, учитывающей демографические процессы, динамику иммунитета и особенности передачи инфекции. Сравнительная оценка долгосрочной эффективности различных схем иммунопрофилактики с помощью современных методов моделирования является актуальной научно-практической задачей. **Цель.** Провести сравнительную оценку долгосрочного эпидемиологического эффекта различных календарных схем вакцинации против кори с использованием разработанной агент-ориентированной имитационной модели. **Материалы и методы.** Разработана пространственно-имплицитная агент-ориентированная стохастическая модель, интегрирующая модули демографии, миграции, материнского и поствакцинального иммунитета, а также возраст-пространственных контактов. В серии 100-летних симуляций для популяции 100 000 агентов сравнивались три сценария: стандартная двухдозовая схема (SRN: 12 мес. и 6 лет), схема с ранней первой дозой (SR9: 9 мес. и 6 лет, строгое окно своевременности) и схема с бустерной дозой (SR3: 12 мес., 6 и 18 лет). Анализировались среднескользящая заболеваемость, межэпидемические интервалы и распределение случаев по возрастам. **Результаты.** Сценарий SR9 продемонстрировал статистически значимое снижение среднескользящей заболеваемости в 2,5 раза, по сравнению с базовым сценарием SRN. При SR9 наблюдались более длинные межэпидемические интервалы (6,12 лет против 5,75 лет у стандартной двухдозовой схемы), двукратное снижение пиковой заболеваемости и более сглаженная динамика вспышек. Распределение случаев по возрастам показало значительное снижение заболеваемости как среди детей до года жизни, так и среди взрослых (18+) в сценарии SR9, по сравнению с SRN и SR3. Введение бустерной дозы (SR3) не привело к значимому снижению среднескользящей заболеваемости, по сравнению со стандартной схемой. **Выводы.** Оптимизация календаря вакцинации, предполагающая смещение первой дозы на более ранний возраст (9 месяцев) в сочетании со строгим контролем за своевременностью введения препарата, может обеспечить более значимое и устойчивое снижение заболеваемости корью, по сравнению со стандартной или расширенной бустерной схемами. Полученные результаты подчеркивают важность уточнения возраста начала вакцинации и регламентации сроков ее проведения как ключевых факторов долгосрочного эпидемиологического контроля.

Ключевые слова: корь, вакцинация, агент-ориентированное моделирование, популяционный иммунитет

Конфликт интересов не заявлен.

Для цитирования: Поздняков А. А. Сравнительная оценка эффективности схем иммунопрофилактики кори методами агент-ориентированного моделирования. Эпидемиология и Вакцинопрофилактика. 2026;25(3):58-66. <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2026-25-3-58-66>

Comparative evaluation of the effectiveness of measles immunization regimens using agent-based modeling methods

AA Pozdnyakov**

Sechenov University, Moscow, Russia

Abstract

Relevance. Achieving and sustaining measles control requires optimization of vaccination schedules that account for demographic changes, immunity dynamics, and infection transmission patterns. A comparative assessment of the long-term effectiveness of different immunization schedules using modern modeling techniques is a relevant scientific and practical task. **Objective.** To conduct a comparative assessment of the long-term epidemiological effect of different measles vaccination schedules using the developed agent-based simulation model. **Materials and Methods.** A spatially implicit agent-based stochastic model was developed, integrating modules for demography, migration, maternal and vaccine-induced immunity, and age-specific spatial

* Для переписки: Поздняков Артём Александрович, старший преподаватель, ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 143409, МО, г. Красногорск, ул. Ленина, д.34, кв.22. +7 (910) 421-27-70, pozdneyakov_a_a@staff.sechenov.ru.

©Поздняков А. А.

** For correspondence: Pozdnyakov Artem A., senior lecturer, Sechenov University, apt. 22, 34, Lenin St., Krasnogorsk, Moscow Region, 143409, Russia. ©Pozdnyakov AA.

contacts. In a series of 100-year simulations for a population of 100,000 agents, three scenarios were compared: a standard two-dose schedule (SRN: 12 months and 6 years), a schedule with an earlier first dose (SR9: 9 months and 6 years, strict timeliness window), and a schedule with a booster dose (SR3: 12 months, 6 and 18 years). The analysis focused on the long-term average incidence, inter-epidemic intervals, and the age distribution of cases. **Results.** The SR9 scenario demonstrated a statistically significant 2.5-fold reduction in the long-term average incidence compared to the baseline SRN scenario. SR9 was associated with longer inter-epidemic intervals (6.12 years vs. 5.75 years for SRN), a twofold reduction in peak incidence, and smoother outbreak dynamics. The age distribution of cases showed a significant reduction in incidence both among children under one year and among adults (18+) in the SR9 scenario compared to SRN and SR3. The introduction of a booster dose (SR3) did not lead to a significant reduction in long-term average incidence compared to the standard schedule. **Conclusions.** Optimization of the vaccination calendar involving an earlier administration of the first dose (9 months) combined with strict control over vaccination timeliness can provide a more significant and sustained reduction in measles incidence compared to standard or extended booster schedules. The obtained results highlight the importance of refining the age at vaccination initiation and regulating the timing of vaccine administration as key factors for long-term epidemiological control.

Keywords: measles, vaccination, agent-based modeling, herd immunity

No conflict of interest to declare.

For citation: Pozdnyakov AA. Comparative evaluation of the effectiveness of measles immunization regimens using agent-based modeling methods. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2026;25(3):58-66 (In Russ.). <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2026-25-3-58-66>

Введение

Корь остается одной из основных причин детской смертности в мире: до внедрения массовой вакцинации в 1963 году она ежегодно вызывала около 30 млн случаев заболевания и 2 млн летальных исходов [1]. Несмотря на наличие эффективной и безопасной вакцины, глобальная ситуация по кори в последние годы характеризуется крайней нестабильностью. В 2000–2017 гг. благодаря увеличению охвата прививками удалось добиться снижения заболеваемости на 83 % и смертности на 80 % [1,2]. Однако с 2016–2017 гг. наметился устойчивый рост заболеваемости во всех шести регионах ВОЗ, за исключением Американского [3,4,5]. В 2019 г. было зарегистрировано 869 770 случаев, что на 556 % выше показателей 2016 года [6], а в 2023 г. тенденция к росту сохранилась, достигнув 322 216 случаев [7].

Пандемия COVID-19 стала катализатором системного кризиса программ иммунизации. Перегрузка систем здравоохранения, логистические сбои и социально-экономические барьеры привели к тому, что 23–94 млн детей пропустили плановую вакцинацию, а 56–66 стран полностью приостановили кампании массовой иммунизации. Постпандемическое восстановление мобильности и накопление когорт восприимчивых лиц создали предпосылки для взрывного роста заболеваемости в 2023–2024 гг. [8].

Ключевыми факторами, определяющими сохранение циркуляции вируса кори, выступают: недостаточный охват и несвоевременность вакцинации, кластеризация непривитых лиц в отдельных сообществах, повышающая эффективное репродуктивное число на 18–60 %, феномен вторичного провала вакцинации (2–10 % дважды привитых утрачивают защитные антитела через 10–15 лет) [9,10,11,12], а также различия в продолжительности и качестве поствакцинального и постинфекционного иммунитета [13,14]. Важную роль играют

миграционные процессы и международный туризм, обеспечивающие занос вируса в благополучные регионы [15,16,17,18].

Иммунологические исследования показывают, что возраст введения первой дозы критически влияет на эффективность защиты. Данная проблема особенно актуальна в условиях, когда большинство матерей детородного возраста имеют поствакцинальный, а не постинфекционный иммунитет, что сокращает продолжительность и напряженность пассивной защиты новорожденных [19].

Для оценки эффективности различных стратегий иммунизации широко применяются методы математического моделирования. Компартментальные модели (SIR, SEIR, SVEIR) позволяют оценить пороговые значения популяционного иммунитета и влияние охвата вакцинацией на динамику заболеваемости [20,21,22]. Однако они не учитывают гетерогенность контактов, индивидуальные траектории иммунитета и пространственную структуру популяции. Агент-ориентированные модели (АОМ) лишены этих ограничений и позволяют имитировать сложные социальные взаимодействия, возрастную структуру контактов, угасание материнского и поствакцинального иммунитета, а также влияние миграционных процессов [23,24]. Такие модели особенно ценны для сравнительной оценки альтернативных календарей вакцинации в долгосрочной перспективе.

В Российской Федерации, несмотря на многолетнее поддержание высоких охватов вакцинацией, с 2009 года наблюдается устойчивая тенденция к росту заболеваемости корью [25]. Это требует пересмотра стратегии иммунопрофилактики кори. Направления оптимизации, обсуждаемые в мировой литературе, включают: перенос возраста первой дозы на более ранний срок (6–9 месяцев) в странах с высоким риском раннего заражения [26,27], сокращение допустимого интервала для своевременной вакцинации [28], а также

введение бустерных доз для групп риска [29,30]. Однако сравнительная эффективность этих подходов требует количественной оценки с помощью современных методов моделирования.

Цель исследования

Провести сравнительную оценку долгосрочного эпидемиологического эффекта различных календарных схем вакцинации против кори с использованием разработанной агент-ориентированной имитационной модели.

Материалы и методы

Исследование основано на методах компьютерного имитационного моделирования. Для оценки эффективности схем вакцинации нами была разработана агент-ориентированная стохастическая имитационная модель пространственно-имплицитной передачи инфекции с демографическими процессами, реализующая расширенную по-агентную схему SVEIR. Данная модель интегрирует демографические процессы, пространственное распределение населения и детализированную программу вакцинации. Модель также учитывает возрастную структуру контактов, материнский иммунитет, сезонность передачи и миграционные потоки. Особенностью является возможность реализации моделирования многодозовой схемы вакцинации с учетом своевременности введения доз и угасания поствакцинального иммунитета. Пространственный модуль модели имеет адаптивную координатную сетку и учитывает матрицу контактов возрастных групп, что позволяет имитировать контакты между индивидами в популяции.

Модельная симуляция представлена серией модульных элементов, изменяющих состояние агентов в модели. Шаг модели представлен посуточно в рамках модифицированных календарных условий. Все месяцы в модели имеют 4 недели и составляют 28 дней. Модельный год длится 12 месяцев и соответствует 336 дням. Это позволяет снизить нагрузку на расчёт дат и унифицировать вывод отчётной статистики.

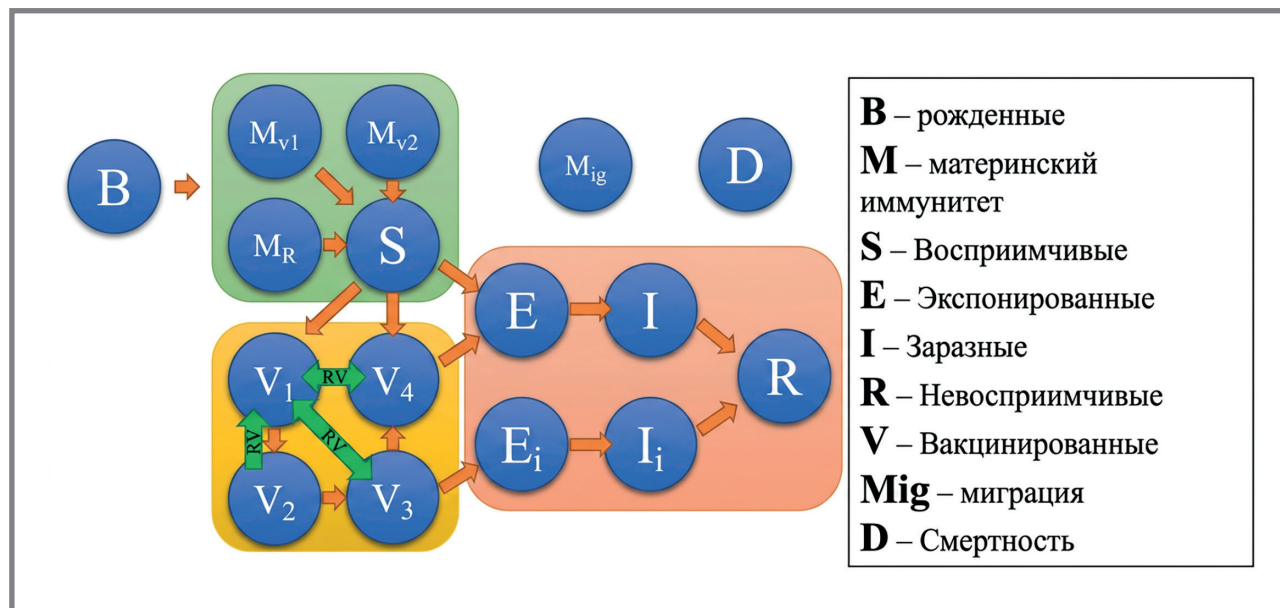
Архитектура модели включает ряд взаимодействующих модулей, каждый из которых отвечает за определенный аспект эпидемического процесса. Базовый модуль обеспечивает инициализацию симуляции, управление популяцией агентов и пространственной структурой. Пространственная среда представлена тороидальной сеткой с адаптивной размерностью, подстраивающейся под начальную численность популяции в 100 000 агентов. Продолжительность симуляции составляет 100 лет, при этом запись результатов производится за последние 10 лет симуляции. Модуль демографии моделирует естественное движение населения с учетом функций рождаемости и смертности. Годовой коэффициент рождаемости установлен на уровне 0,8 %, а годовой коэффициент смертности – 0,9 % с калибровкой ожидаемой

продолжительности жизни на основе логистической кривой. Модуль возбудителя задает биологические характеристики вируса кори: базовое репродуктивное число $R_0 = 18,07$, длительность инкубационного периода 12 дней и периода заразности 8 дней, а также вектор помесечных сезонных коэффициентов передачи инфекции. Миграционный модуль ежегодно добавляет 0,5 % от популяции новых агентов, которые распределяются равномерно в пространстве и во времени согласно пуассоновскому процессу, при этом их иммунный статус определяется вероятностно для имитации заноса инфекции извне. Модуль материнского иммунитета описывает нелинейное угасание пассивных антител у новорожденных в зависимости от иммунного статуса матери. Модуль эффективных контактов определяет вероятность заражения восприимчивого агента на основе возрастной матрицы контактов 12×12 (по данным Mossong et al.) и пространственной свертки с экспоненциально убывающим ядром в зависимости от манхэттенского расстояния между агентами, интегрируя сезонные коэффициенты. Модуль вакцинации реализует три сравниваемые схемы иммунопрофилактики с охватом каждой дозы не менее 90 %, иммунологической эффективностью вакцины 99 % и долей отказов 5 %. Учитываются окна своевременности введения доз (3–12 месяцев) и возрастные точки вакцинации.

Поступление агентов в модельную популяцию происходит посредством модулей «Рождаемость» и «Миграция». Рождённый агент в зависимости от состояния материнского агента получает состояние MR (если мать была в состоянии R) или один из вариантов состояния MV (если мать была в одном из состояний V). Через некоторое время все агенты из состояния M переходят в состояние S и становятся восприимчивыми (рис. 1).

В соответствии с модулем «Эффективные контакты» агент из состояния S переходит в состояние экспонированного E и далее в состояние заразного I. В данной модели состояние E не является отображением инкубационного периода, поскольку нас интересует не клиническая картина, а заразность агента. Состояние I определяется не днями болезни, а днями заразности агента. После состояния I агент переходит в состояние невосприимчивого R. В соответствии с модулем «Вакцинация» агент из состояния восприимчивого S может перейти в состояние V1 (вакцинация обеспечивает полноценную защиту, контакт с возбудителем сохраняет состояние) или в состояние V4 (вакцинация защиту не обеспечивает, контакт с возбудителем приводит к клиническому течению $E \rightarrow I \rightarrow R$). Из состояния V1 агент вероятностно может перейти в состояние V2 (вакцинация обеспечивает полноценную защиту, контакт с возбудителем производит бустеризацию и возвращает в состояние V1), которое, в свою очередь, может перейти в состояние V3 (вакцинация обеспечивает частичную защиту, контакт с возбудителем приводит к лёгкой, стёртой или скрытой

Рисунок 1. Схема перехода состояний агентов в модели
Figure 1. Scheme of switching the agent mode in the model



форме течения заболевания $E_i \rightarrow I_i \rightarrow R$). Состояние V_3 также вероятно может перейти в состояние V_4 . Повторные вакцинации агента либо переводят его в состояние V_1 , либо сохраняют текущее состояние. Таким образом, в рамках этой модели вакцинированный агент не тождественен переболевшему. Мигрирующие агенты Mig добавляются в популяцию в соответствии с параметрами модуля «Миграция» и могут поступать в любом из возможных состояний. Исключение агентов из популяции производится посредством модуля «Смертность», который соответствует переходу агента в состояние смерти D и может происходить из любого состояния агента.

Произведено сравнение трех схем вакцинации: SRN – первая доза в 12 месяцев, вторая в 6 лет (окно своевременности – 12 мес.); SR9 – первая доза в 9 месяцев, вторая в 6 лет (окно своевременности – 3 мес.); SR3 – первая доза в 12 мес., вторая в 6 лет, третья в 18 лет (окно своевременности – 12 мес.). Для сравнительного анализа использовались показатели последних 10 лет моделирования (после стабилизации системы). Рассчитывались среднескользящая заболеваемость, межэпидемические интервалы, пиковая заболеваемость и распределение случаев по возрастным группам. Результаты представлены с 95 % доверительными интервалами, полученными в результате множественных запусков модели.

Результаты и обсуждение

В рамках настоящего исследования была проведена серия вычислительных экспериментов с использованием разработанной агент-ориентированной стохастической имитационной модели. Целью моделирования являлась сравнительная оценка влияния различных схем вакцинации

против кори на долгосрочную динамику эпидемического процесса, структуру заболеваемости и формирование популяционного иммунитета. Базовые параметры моделирования были унифицированы для всех сценариев: исходная численность популяции составляла 100000 агентов, общая продолжительность симуляции – 100 лет, что позволило наблюдать несколько полных эпидемических циклов и минимизировать влияние начальных условий. В модели были заданы следующие демографические показатели: ежегодный уровень рождаемости составил 0,8 %, уровень смертности – 0,9 %, а ежегодный приток мигрантов был установлен на уровне 0,5 % от общей численности населения. Возбудитель кори характеризовался высоким базовым репродуктивным числом ($R_0 = 18,07$) и периодом заразности 8 дней. Параметры вакцинопрофилактики включали охват не менее 90 % для каждой дозы, эффективность вакцины на уровне 99 % и долю отказов от вакцинации – 5 %.

Были смоделированы и проанализированы три разных сценария вакцинации, ключевые различия между которыми заключались в возрасте введения доз и временном окне для оценки своевременности вакцинации (табл. 1).

Сценарий 1 (SRN) соответствовал стандартной двухдозовой схеме с первой дозой в 12 месяцев и второй в 6 лет.

Сценарий 2 (SR9) предполагал более раннее начало вакцинации – в 9 месяцев, с сохранением второй дозы в 6 лет и существенным сокращением окна своевременности вакцинации до 3 месяцев.

Сценарий 3 (SR3), также начинавшийся в 12 месяцев, включал дополнительную, третью дозу вакцины в возрасте 18 лет при стандартном годовом окне своевременности. Сравнительный анализ проводился

Таблица 1. Сравнимые сценарии запуска симуляций в агентной модели
Table 1. Comparable scenarios for running simulations in an agent-based model

Номер сценария Scenario number	Сценарий 1 (SRN) Scenario 1 (SRN)	Сценарий 2 (SR9) Scenario 2 (SR9)	Сценарий 3 (SR3) Scenario 3 (SR3)
Возраст первой дозы вакцины Age at first vaccine dose	12 месяцев 12 months	9 месяцев 9 months	12 месяцев 12 months
Возраст второй дозы вакцины Age at second vaccine dose	6 лет 6 years		
Возраст третьей дозы вакцины Age at third vaccine dose	-	-	18 лет 18 years
Диапазон оценки своевременности вакцинации Vaccination timeliness assessment window	12 месяцев 12 months	3 месяца 3 months	12 месяцев 12 months

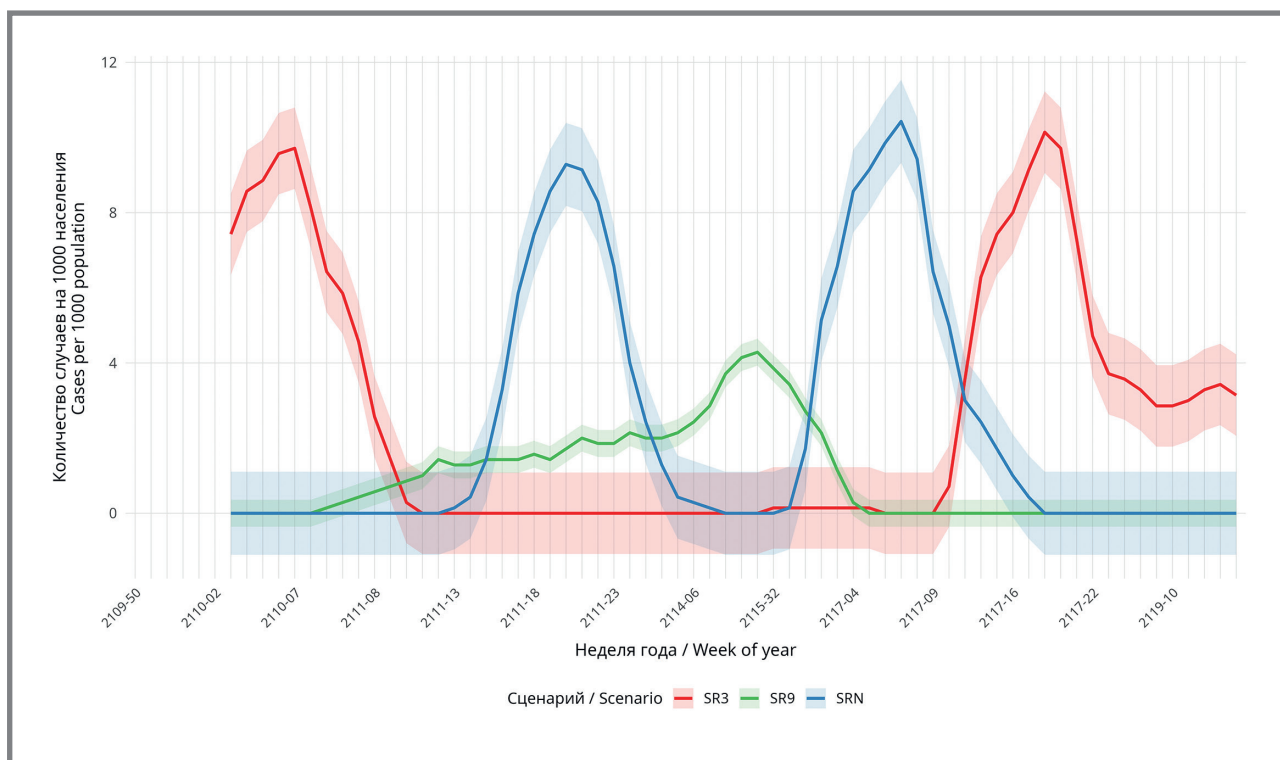
по итогам последних 10 лет моделирования, когда популяция достигла относительной стабилизации поствакцинального иммунного статуса.

Многолетняя динамика заболеваемости корью в модели продемонстрировала выраженную циклическую картину во всех рассматриваемых вариантах. Однако ключевые количественные и качественные характеристики этих циклов существенно различались (рис. 2). При базовом сценарии (SRN) среднее расстояние между эпидемическими подъемами составило 5,75 лет, что указывает на относительно быстрое накопление когорты восприимчивых лиц в популяции. В сценарии

SR9 межэпидемический интервал увеличился до 6,12 лет, а в сценарии SR3 – до 7,23 лет. Увеличение интервала между подъемами в сценарии SR3 свидетельствует о более длительном периоде, необходимом для восстановления критической массы восприимчивых индивидуумов, что, с одной стороны, является положительным эффектом, но, с другой, может способствовать более интенсивным вспышкам за счет накопления неиммунных лиц в старших возрастных группах.

Качественный анализ кривых заболеваемости выявил статистически значимые различия в интенсивности эпидемических подъемов. Уровни пиковой

Рисунок 2. Многолетняя динамика заболеваемости корью в симуляционной модели при различных сценариях вакцинации с 95 % доверительным интервалом
Figure 2. Long-term dynamics of measles incidence in a simulation model under different vaccination scenarios with a 95 % confidence interval



заболеваемости в сценариях SRN и SR3 были соизмеримы и не имели достоверных различий. В то же время сценарий SR9 характеризовался двукратным снижением пиковой заболеваемости, по сравнению с базовым сценарием. Кроме того, эпидемические кривые в SR9 имели более растянутую во времени, сглаженную характеристику, что свидетельствует о менее интенсивной циркуляции вируса и более эффективном сдерживании вспышек благодаря измененным параметрам вакцинации.

Наиболее показательной для оценки эффективности вакцинальных стратегий явилась среднемноголетняя заболеваемость, рассчитанная за последнее десятилетие моделирования (рис. 3). Статистический анализ этого показателя выявил четкую иерархию среди сценариев. Среднемноголетняя заболеваемость при сценарии SR9 оказалась в 2,5 раза ниже, чем при базовом сценарии SRN. Данное различие было статистически значимым. При этом между сценариями SRN и SR3, несмотря на введение дополнительной дозы, достоверной разницы в уровне среднемноголетней заболеваемости зафиксировано не было. Этот результат указывает на то, что не столько количество доз, сколько возраст их введения и строгость соблюдения графика играют критическую роль в формировании устойчивого популяционного иммунитета.

Для понимания механизмов, лежащих в основе выявленных различий, был проведен детальный анализ распределения случаев заболеваний по

возрастным группам (рис. 4). Возрастная структура заболеваемости является ключевым маркером эффективности программы вакцинопрофилактики. Результаты моделирования показали, что сценарий SR9 обеспечил статистически значимое снижение числа случаев заболевания как среди детей в возрасте до одного года, так и среди взрослых в группе 18 лет и старше, по сравнению с другими схемами. Снижение заболеваемости у детей до года можно объяснить эффектом более ранней защиты, предоставляемой первой дозой в 9 месяцев, что критически важно в период угасания материнского иммунитета. Это сокращает «иммунную брешь» – уязвимый интервал между исчезновением материнских антител и получением первой дозы вакцины.

Что касается взрослой популяции, то здесь наблюдаемая картина имеет комплексное объяснение. В сценарии SR3, несмотря на введение третьей дозы в 18 лет, отмечалась тенденция к увеличению числа случаев в старшей возрастной группе, по сравнению с SR9. Это связано с непродолжительным характером поствакцинального иммунитета после бустерной дозы и меньшей частотой естественной бустеризации вследствие более редких эпидемических подъемов. Более длинные межэпидемические интервалы (7,23 года в SR3) способствуют накоплению неиммунных лиц среди взрослого населения после угасания эффекта третьей дозы, что в конечном итоге может приводить к более интенсивному развитию эпидемического

Рисунок 3. Среднемноголетняя заболеваемость корью в симуляционной модели при различных сценариях вакцинации с 95 % доверительным интервалом за последние 10 лет симуляции
Figure 3. Average annual measles incidence in the simulation model under different vaccination scenarios with 95 % confidence intervals over the last 10 years of simulation

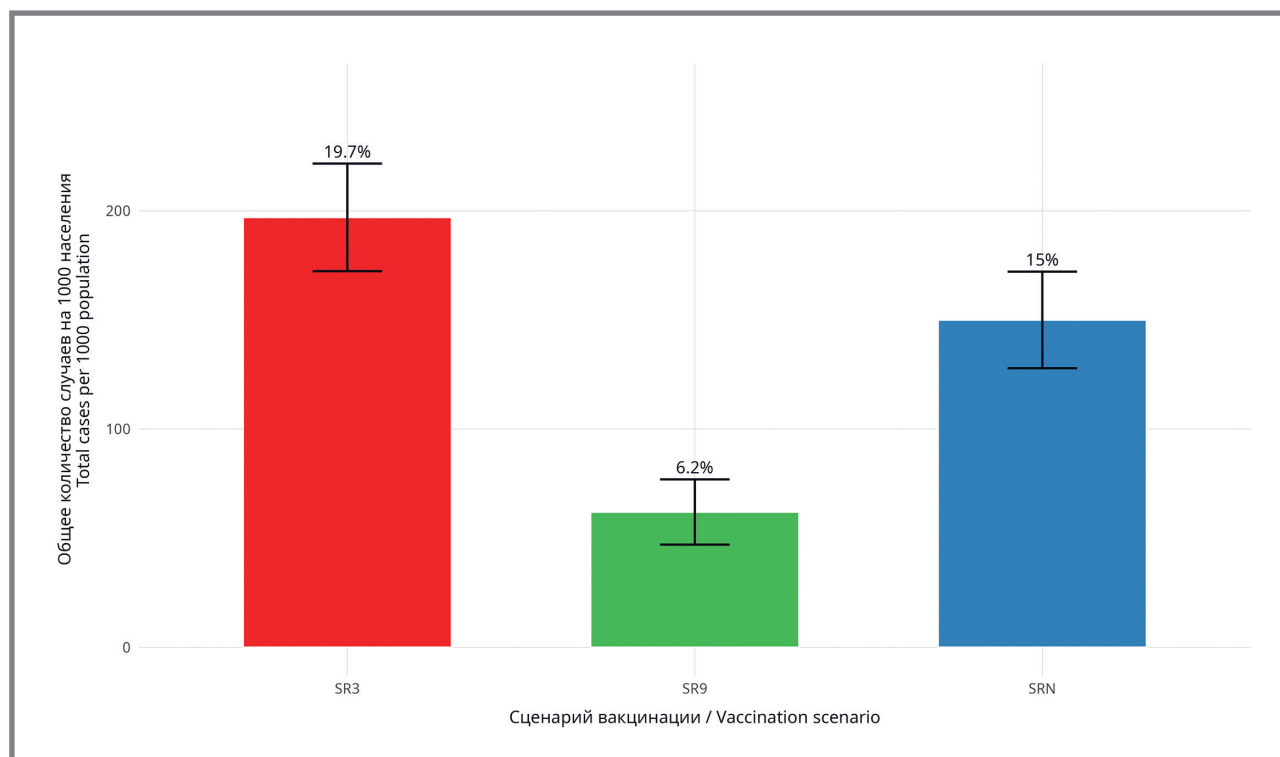
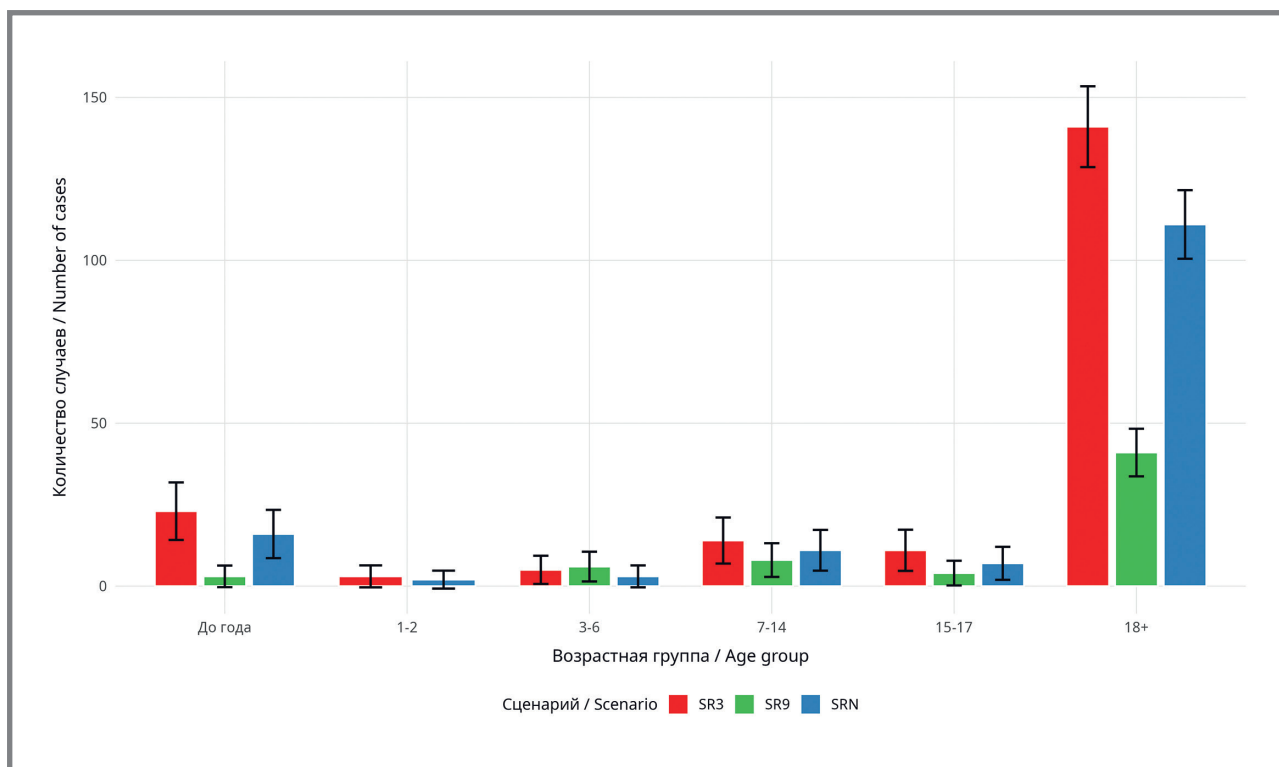


Рисунок 4. Распределение случаев заболеваний корью по возрастным группам в симуляционной модели при различных сценариях вакцинации с 95 % доверительным интервалом за последние 10 лет симуляции
Figure 4. Distribution of measles cases by age group in the simulation model under different vaccination scenarios with 95 % confidence intervals over the last 10 years of simulation



процесса в этих когортах. Напротив, более ранняя вакцинация в сценарии SR9, по-видимому, создает кумулятивный эффект, приводя к лучшему долгосрочному поддержанию иммунной прослойки и, как следствие, к снижению риска заноса и распространения инфекции во взрослых коллективах.

Выводы

Таким образом, на основании проведенного имитационного моделирования можно сделать вывод, что среди протестированных стратегий сценарий вакцинации SR9, предусматривающий введение первой дозы в возрасте 9 месяцев с сокращенным окном своевременности и без дополнительной бустерной дозы, продемонстрировал наивысшую

эпидемиологическую и, предположительно, экономическую эффективность, поскольку используется меньшее число доз, по сравнению с сценарием SR3. Данная схема не только обеспечила статистически значимое снижение средней многолетней заболеваемости и пиковой интенсивности вспышек, но и привела к благоприятным сдвигам в возрастной структуре заболевших, минимизируя риски как для наиболее уязвимой группы младенцев, так и для взрослого населения. Полученные результаты подчеркивают важность оптимизации не только количества доз в календаре прививок, но и таких параметров, как возраст начала вакцинации и регламентация сроков ее проведения, для достижения долгосрочного и устойчивого контроля над корью.

Литература

- Berche P. History of measles. *Presse Med.* 2022;51(3):104149. doi: 10.1016/j.lpm.2022.104149
- Chen HL, Tang RB. Measles re-emerges and recommendation of vaccination. *J Chin Med Assoc.* 2020;83(1):5–7. doi: 10.1097/JCMA.0000000000000210
- Cochi SL, Schluter WW. What it will take to achieve a world without measles. *J Infect Dis.* 2020;222(7):1073–1075. doi: 10.1093/infdis/jiaa045
- Hübschen JM, Gouandjika-Vasilache I, Dina J. Measles. *Lancet.* 2022;399(10325):678–690. doi: 10.1016/S0140-6736(21)02004-3
- Cutts FT, Ferrari MJ, Krause LK, et al. Vaccination strategies for measles control and elimination: time to strengthen local initiatives. *BMC Med.* 2021;19(1):2. doi: 10.1186/s12916-020-01843-z
- Vojtek I, Larson H, Plotkin S, et al. Evolving measles status and immunization policy development in six European countries. *Hum Vaccin Immunother.* 2022;18(1):2031776. doi: 10.1080/21645515.2022.2031776
- Moss WJ, Griffin DE. What's going on with measles? *J Virol.* 2024;98(8):e0075824. doi: 10.1128/jvi.00758-24
- Sanchez DJ. Measles virus: continued outbreaks while striving for eradication. *Virulence.* 2024;15(1):2386022. doi: 10.1080/21505594.2024.2386022
- Tranter I, Smoll N, Lau CL, et al. Onward virus transmission after measles secondary vaccination failure. *Emerg Infect Dis.* 2024;30(9):1747–1754. doi: 10.3201/eid3009.240150
- Gibney KB, Attwood LO, Nicholson S, et al. Emergence of attenuated measles illness among IgG-positive/IgM-negative measles cases: Victoria, Australia, 2008–2017. *Clin Infect Dis.* 2020;70(6):1060–1067. doi: 10.1093/cid/ciz363

11. Barnekow D, Neucum D, Tout W, et al. Measles secondary vaccine failure in a childcare setting: an outbreak report. *Commun Dis Intell* (2018). 2024;48. doi: 10.33321/cdi.2024.48.61
12. Zibolenová J, Hudečková H, Chladná Z, et al. Quantification of waning immunity after measles vaccination-evidence from a seroprevalence study. *Am J Epidemiol*. 2023;192(8):1379–1385. doi: 10.1093/aje/kwad065
13. Bolotin S, Osman S, Hughes SL, et al. In elimination settings, measles antibodies wane after vaccination but not after infection: a systematic review and meta-analysis. *J Infect Dis*. 2022;226(7):1127–1139. doi: 10.1093/infdis/jiac039
14. Bianchi FP, Mascipinto S, Stefanizzi P, et al. Long-term immunogenicity after measles vaccine vs. wild infection: an Italian retrospective cohort study. *Hum Vaccin Immunother*. 2021;17(7):2078–2084. doi: 10.1080/21645515.2020.1871296
15. Feemster KA, Szipszky C. Resurgence of measles in the United States: how did we get here? *Curr Opin Pediatr*. 2020;32(1):139–144. doi: 10.1097/MOP.0000000000000845
16. Keske Ş, Özsüreki Y, Ergönül Ö. An alarming emergence of measles in Europe: gaps and future directions. *Balkan Med J*. 2024;41(5):321–323. doi: 10.4274/balkanmedj.galenos.2024.060824
17. Bosetti P, Poletti P, Stella M, et al. Heterogeneity in social and epidemiological factors determines the risk of measles outbreaks. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2020;117(48):30118–30125. doi: 10.1073/pnas.1920986117
18. Rubalskaia TS, Erokhov DV, Zherdeva PE, et al. Global genetic diversity of measles virus (Paramyxoviridae: Morbillivirus: Morbillivirus hominis): historical aspects and current state. *Vopr Virusol*. 2023;68(5):361–371. doi: 10.36233/0507-4088-187
19. Xu J, Doyon-Plourde P, Tunis M, et al. Effect of early measles vaccination on long-term protection: a systematic review. *Vaccine*. 2021;39(22):2929–2937. doi: 10.1016/j.vaccine.2021.04.012
20. Bidari S, Yang W. The impact of household size on measles transmission: a long-term perspective. *Epidemics*. 2024;49:100791. doi: 10.1016/j.epidem.2024.100791
21. Akuka PNA, Seidu B, Okyere E, et al. Fractional-order epidemic model for measles infection. *Scientifica (Cairo)*. 2024;2024:8997302. doi: 10.1155/2024/8997302
22. Thompson KM. Modeling and managing the risks of measles and rubella: a global perspective, part II. *Risk Anal*. 2017;37(1):1–11. doi: 10.1111/risa.12823
23. Hunter E, Kelleher JD. Using a hybrid agent-based and equation based model to test school closure policies during a measles outbreak. *BMC Public Health*. 2021;21(1):499. doi: 10.1186/s12889-021-10513-5
24. Vysochanskaya SO, Saltykova ST, Zhernov YV, et al. Agent-based model of measles epidemic development in small-group settings. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2024;59:101574. doi: 10.1016/j.imu.2024.101574
25. Цвирук О.В., Герасимова А.Г., Тураева Н.В. и др. Эффективна ли существующая в Российской Федерации схема вакцинации против кори? // Эпидемиология и Вакцинопрофилактика. – 2025. – Т. 24, № 2. – С. 4–13. – DOI 10.31631/2073-3046-2025-24-2-4-13.
26. Goult E, Barrero Guevara LA, Briga M, et al. Estimating the optimal age for infant measles vaccination. *Nat Commun*. 2024;15(1):9919. doi: 10.1038/s41467-024-53415-x
27. Huang Y, Meng L, Zhao HL. Measles vaccination in infants younger than 9 months. *Lancet Infect Dis*. 2020;20(3):280–281. doi: 10.1016/S1473-3099(20)30048-7
28. Tang XY, Cheng M, Geater A, et al. Multi-level determinants of failure to receive timely and complete measles vaccinations in Southwest China: a mixed methods study. *Infect Dis Poverty*. 2021;10(1):102. doi: 10.1186/s40249-021-00885-6
29. Kim YC, Nam H, Choi JY, et al. The third dose of measles-containing vaccine induces robust immune responses against measles in young seronegative healthcare workers who had previous two-dose measles vaccination. *J Infect Public Health*. 2023;16(10):1643–1649. doi: 10.1016/j.jiph.2023.08.002
30. Alonge OD, Marin M, Hickman CJ, et al. Long-term neutralizing antibody levels against measles and rubella viruses among adults with 3 doses of measles-mumps-rubella vaccine. *Open Forum Infect Dis*. 2024;11(1):ofad700. doi: 10.1093/ofid/ofad700

References

1. Berche P. History of measles. *Presse Med*. 2022;51(3):104149. doi: 10.1016/j.lpm.2022.104149
2. Chen HL, Tang RB. Measles re-emerges and recommendation of vaccination. *J Chin Med Assoc*. 2020;83(1):5–7. doi: 10.1097/JCMA.0000000000000210
3. Cochi SL, Schluter WW. What it will take to achieve a world without measles. *J Infect Dis*. 2020;222(7):1073–1075. doi: 10.1093/infdis/jiaa045
4. Hübschen JM, Gouandjika-Vasilache I, Dina J. Measles. *Lancet*. 2022;399(10325):678–690. doi: 10.1016/S0140-6736(21)02004-3
5. Cutts FT, Ferrari MJ, Krause LK, et al. Vaccination strategies for measles control and elimination: time to strengthen local initiatives. *BMC Med*. 2021;19(1):2. doi: 10.1186/s12916-020-01843-z
6. Vojtek I, Larson H, Plotkin S, et al. Evolving measles status and immunization policy development in six European countries. *Hum Vaccin Immunother*. 2022;18(1):2031776. doi: 10.1080/21645515.2022.2031776
7. Moss WJ, Griffin DE. What's going on with measles? *J Virol*. 2024;98(8):e0075824. doi: 10.1128/jvi.00758-24
8. Sanchez DJ. Measles virus: continued outbreaks while striving for eradication. *Virulence*. 2024;15(1):2386022. doi: 10.1080/21505594.2024.2386022
9. Tranter I, Smoll N, Lau CL, et al. Onward virus transmission after measles secondary vaccination failure. *Emerg Infect Dis*. 2024;30(9):1747–1754. doi: 10.3201/eid3009.240150
10. Gibney KB, Attwood LO, Nicholson S, et al. Emergence of attenuated measles illness among IgG-positive/IgM-negative measles cases: Victoria, Australia, 2008–2017. *Clin Infect Dis*. 2020;70(6):1060–1067. doi: 10.1093/cid/ciz363
11. Barnekow D, Neucum D, Tout W, et al. Measles secondary vaccine failure in a childcare setting: an outbreak report. *Commun Dis Intell* (2018). 2024;48. doi: 10.33321/cdi.2024.48.61
12. Zibolenová J, Hudečková H, Chladná Z, et al. Quantification of waning immunity after measles vaccination-evidence from a seroprevalence study. *Am J Epidemiol*. 2023;192(8):1379–1385. doi: 10.1093/aje/kwad065
13. Bolotin S, Osman S, Hughes SL, et al. In elimination settings, measles antibodies wane after vaccination but not after infection: a systematic review and meta-analysis. *J Infect Dis*. 2022;226(7):1127–1139. doi: 10.1093/infdis/jiac039
14. Bianchi FP, Mascipinto S, Stefanizzi P, et al. Long-term immunogenicity after measles vaccine vs. wild infection: an Italian retrospective cohort study. *Hum Vaccin Immunother*. 2021;17(7):2078–2084. doi: 10.1080/21645515.2020.1871296
15. Feemster KA, Szipszky C. Resurgence of measles in the United States: how did we get here? *Curr Opin Pediatr*. 2020;32(1):139–144. doi: 10.1097/MOP.0000000000000845
16. Keske Ş, Özsüreki Y, Ergönül Ö. An alarming emergence of measles in Europe: gaps and future directions. *Balkan Med J*. 2024;41(5):321–323. doi: 10.4274/balkanmedj.galenos.2024.060824
17. Bosetti P, Poletti P, Stella M, et al. Heterogeneity in social and epidemiological factors determines the risk of measles outbreaks. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2020;117(48):30118–30125. doi: 10.1073/pnas.1920986117
18. Rubalskaia TS, Erokhov DV, Zherdeva PE, et al. Global genetic diversity of measles virus (Paramyxoviridae: Morbillivirus: Morbillivirus hominis): historical aspects and current state. *Vopr Virusol*. 2023;68(5):361–371. doi: 10.36233/0507-4088-187
19. Xu J, Doyon-Plourde P, Tunis M, et al. Effect of early measles vaccination on long-term protection: a systematic review. *Vaccine*. 2021;39(22):2929–2937. doi: 10.1016/j.vaccine.2021.04.012
20. Bidari S, Yang W. The impact of household size on measles transmission: a long-term perspective. *Epidemics*. 2024;49:100791. doi: 10.1016/j.epidem.2024.100791
21. Akuka PNA, Seidu B, Okyere E, et al. Fractional-order epidemic model for measles infection. *Scientifica (Cairo)*. 2024;2024:8997302. doi: 10.1155/2024/8997302
22. Thompson KM. Modeling and managing the risks of measles and rubella: a global perspective, part II. *Risk Anal*. 2017;37(1):1–11. doi: 10.1111/risa.12823
23. Hunter E, Kelleher JD. Using a hybrid agent-based and equation based model to test school closure policies during a measles outbreak. *BMC Public Health*. 2021;21(1):499. doi: 10.1186/s12889-021-10513-5
24. Vysochanskaya SO, Saltykova ST, Zhernov YV, et al. Agent-based model of measles epidemic development in small-group settings. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2024;59:101574. doi: 10.1016/j.imu.2024.101574
25. Tsvirkun OV, Gerasimova AG, Turava NV, et al. Effektivna li sushchestvuyushchaya v Rossiyskoy Federatsii skhema vaksinatсии protiv kori? *Epidemiologiya i Vaktsinoprofilaktika*. 2025;24(2):4–13. (In Russ.). doi:10.31631/2073-3046-2025-24-2-4-13
26. Goult E, Barrero Guevara LA, Briga M, et al. Estimating the optimal age for infant measles vaccination. *Nat Commun*. 2024;15(1):9919. doi: 10.1038/s41467-024-53415-x
27. Huang Y, Meng L, Zhao HL. Measles vaccination in infants younger than 9 months. *Lancet Infect Dis*. 2020;20(3):280–281. doi: 10.1016/S1473-3099(20)30048-7
28. Tang XY, Cheng M, Geater A, et al. Multi-level determinants of failure to receive timely and complete measles vaccinations in Southwest China: a mixed methods study. *Infect Dis Poverty*. 2021;10(1):102. doi: 10.1186/s40249-021-00885-6
29. Kim YC, Nam H, Choi JY, et al. The third dose of measles-containing vaccine induces robust immune responses against measles in young seronegative healthcare workers who had previous two-dose measles vaccination. *J Infect Public Health*. 2023;16(10):1643–1649. doi: 10.1016/j.jiph.2023.08.002
30. Alonge OD, Marin M, Hickman CJ, et al. Long-term neutralizing antibody levels against measles and rubella viruses among adults with 3 doses of measles-mumps-rubella vaccine. *Open Forum Infect Dis*. 2024;11(1):ofad700. doi: 10.1093/ofid/ofad700

Об авторе

- **Артём Александрович Поздняков** – старший преподаватель, ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия. +7 (910) 421-27-70, pozdnyakov_a_a@staff.sechenov.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0032-9917>.

Поступила: 19.05.2026. Принята к печати: 31.05.2026.

Контент доступен под лицензией CC BY 4.0.

About the Author

- **Artem A. Pozdnyakov** – Senior Lecturer, Sechenov University, Moscow, Russia. +7 (910) 421-27-70, pozdnyakov_a_a@staff.sechenov.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0032-9917>.

Received: 19.05.2026. Accepted: 31.05.2026.

Creative Commons Attribution CC BY 4.0.