



Искусственные общества. 2013-2026

ISSN 2077-5180

URL - <http://artsoc.jes.su>

Все права защищены

Выпуск 4 Том 20. 2025

Агент-ориентированная эпидемиологическая модель СПЕКТР для изучения влияния транспортных коридоров на распространение вирусных инфекций

Бахтизин Альберт Рауфович

*Центральный экономико-математический институт Российской академии наук
Российская Федерация, Москва*

Макаров Валерий Леонидович

*Центральный экономико-математический институт Российской академии наук
Российская Федерация, Москва*

Отмахова Юлия Сергеевна

*Центральный экономико-математический институт Российской академии наук
Российская Федерация, Москва*

Сушко Елена Давидовна

*Центральный экономико-математический институт Российской академии наук
Российская Федерация, Москва*

Аннотация

В работе предложена усовершенствованная агент-ориентированная эпидемиологическая модель России СПЕКТР, предназначенная для оценки эффективности планируемых противоэпидемических мер с учетом межрегиональной передачи вирусов при перемещении агентов-людей через ключевые транспортные коридоры. В разработанной модели предусмотрена имитация распространения эпидемии через взаимодействия агентов-людей, которые воспроизводятся на реальной социально-демографической структуре населения, учитывающей социальные связи и пространственное распределение. В рамках модели, реализованной в суперкомпьютерной версии, создается большая популяция сложных агентов с детализированными свойствами, связанными с их здоровьем, что позволяет воссоздавать соотношение групп агентов, находящихся на разных стадиях заболевания, вызвавшего эпидемию. Для учета транспортного

фактора в распространении инфекций в модель включены новые классы объектов: «Инфекция», «Рейс», «Аэропорт», «Город», «Управляющее противоэпидемическое воздействие». Агентный подход позволил отразить в разработанной модели в явном виде прямые и обратные связи между различными процессами, например, ухудшение базового уровня здоровья у переболевших агентов, что при повторном заражении увеличивает вероятность тяжелого течения заболевания. Авторами исследования для целей моделирования впервые для перемещения агентов-людей по транспортным сетям использовалась реальная эмпирическая база на основе фактических данных ежемесячной динамики перевозок пассажиров по 103 аэропортам России за период 2019–2020 годы, которые точно отражают пассажиропоток до- и во время пандемии, что повышает прогностическую точность вычислительных экспериментов. В работе предложен новый методический подход к учету транспортных коридоров как каналов распространения вирусов в агент-ориентированных эпидемиологических моделях. Предложенная модель может стать одним из элементов системы поддержки принятия решений в рамках ситуационных центров России для оценки влияния ограничений на динамику распространения эпидемий.

Ключевые слова: моделирование эпидемий, пространственное распространение вирусов, транспортные коридоры, агент-ориентированные модели, воссоздание в искусственном обществе социальной и пространственной структуры, поведение агентов, передача вируса, вычислительные эксперименты на моделях социальных процессов, информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений

Дата публикации: 23.12.2025

Источник финансирования:

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-15-2024-525 от 23.04.2024.

Ссылка для цитирования:

Бахтизин А. Р., Макаров В. Л., Отмахова Ю. С., Сушко Е. Д. Агент-ориентированная эпидемиологическая модель СПЕКТР для изучения влияния транспортных коридоров на распространение вирусных инфекций // Искусственные общества. 2025. Т. 20. Выпуск 4.
URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800037165-0-1/> DOI: 10.18254/S207751800037165-0

1

Введение

В современных условиях глобализации и высокой интенсификации международной мобильности населения транспортная система становится ключевым фактором пространственного распространения инфекционных заболеваний с воздушно-капельным механизмом передачи возбудителя, что вызывает необходимость разработки новых подходов к прогнозированию эпидемий. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ),

эпидемиологическая обстановка в мире остается напряженной. В 2024 году ВОЗ обновила список патогенов, включив в него более 30 вирусов и бактерий, которые способны вызвать масштабную эпидемию. Глобальная безопасность человечества сталкивается с беспрецедентными биологическими угрозами, связанными с распространением вирусных инфекций. Пандемия COVID-19 продемонстрировала уязвимость современного общества перед лицом новых патогенов и необходимость совершенствования систем прогнозирования и противодействия эпидемиям.

² В современном мире система глобального здравоохранения сталкивается с комплексом новых вызовов, требующих фундаментального переосмысления существующих подходов. Одним из ключевых элементов грядущих трансформаций становится Пандемическое соглашение ВОЗ-2025¹, призванное задать новые рамки международного реагирования на биологические угрозы. Особую остроту проблеме придаёт феномен «путешествующих вирусов»: в условиях интенсификации трансграничных перемещений передача патогенов между регионами, странами и континентами приобрела регулярный характер, превратившись в устойчивую эпидемиологическую реальность.

³ Параллельно наблюдается принципиальное смещение акцентов, а именно слияние повестки медицины и здравоохранения с политикой международных отношений, где вопросы биологической безопасности становятся неотъемлемым элементом геополитической стратегии. Примечательно, что эксперты Международного дискуссионного клуба «Валдай» неоднократно высказывались о происходящих концептуальных трансформациях персонализированного термина «здоровье», которое отчуждается в пользу парадигмы глобальной безопасности, где приоритет отдаётся не индивидуальным потребностям, а коллективным механизмам предотвращения пандемических рисков.

⁴ Появление новых штаммов известных вирусов, а также возникновение ранее неизвестных патогенов требует разработки инновационных подходов к моделированию и прогнозированию распространения инфекционных заболеваний. Особую значимость приобретает развитие агент-ориентированного моделирования эпидемиологических процессов, позволяющего учитывать индивидуальные характеристики населения, социальные связи и региональные особенности распространения инфекций. Данный подход демонстрирует существенные преимущества перед классическими компартментными моделями, обеспечивая более точную имитацию реальных эпидемиологических процессов.

⁵ Агент-ориентированное моделирование открывает новые возможности для оценки эффективности противоэпидемических мер и разработки стратегий противодействия биологическим угрозам. Создание современных эпидемиологических моделей становится критически важным инструментом для обеспечения биологической безопасности на национальном и международном уровнях, а также для оценки влияния ограничений на динамику распространения эпидемий.

⁶ Целью нашего исследования является уточнение агент-ориентированной эпидемиологической модели с учетом пространственного распространения

вирусных инфекций в контексте возможного возникновения новых глобальных биологических угроз. Основными задачами исследования являются: выявление современных подходов и моделей, применяемых при моделировании эпидемиологических процессов для учета пространственного распространения вирусов через транспортные коридоры; разработка подходов к учету влияния воздушного транспорта на распространения вирусной эпидемии; создание базы данных по ключевым пассажирским транспортным коридорам, потенциально способствующим распространению инфекций между регионами России; разработка агент-ориентированной модели, которая обеспечит гибкую настройку на различные (как существующие, так и новые) виды инфекций, прозрачность влияния управляющих параметров модели на результаты моделирования, удобство постановки модельных экспериментов для пользователя; формирование прогнозных сценариев распространения инфекции между регионами и оценки влияния мер сдерживания.

⁷ В современных условиях требуется разработка национального инструментария для моделирования сценариев возможных пандемий с учётом мобильности населения. Такой инструментарий на основе проводимых компьютерных экспериментов должен обеспечивать прогнозирование нагрузки на системы здравоохранения и оценку эффективности планируемых мер сдерживания (карантин, вакцинация и др.).

⁸

Анализ применения агент-ориентированного подхода при моделировании эпидемиологических процессов

При анализе зарубежных публикаций можно отметить значительный интерес к применению агентного подхода при разработке моделей распространения различных вирусов, начиная с 2009 года, например: вирусов Денге ², кори ³, SARS-CoV-2 ^{4 5 6}. При этом использование возможностей компьютерного моделирования в прогнозировании распространения инфекций обсуждается в журналах-лидерах мировой науки издательства Nature⁷. Отдельно хотелось бы отметить наиболее интересные работы зарубежных авторов из организаций-лидеров в области моделирования эпидемий ^{8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18}.

⁹ В области эпидемиологического моделирования с учетом реально созданных агент-ориентированных моделей передачи вируса от человека к человеку можно выделить ряд работ российских исследователей^{19 20 21 22 23 24 25 26}. В ряде исследований подчеркивается роль воздушного транспорта в распространении вирусов, которая серьезно повлияла на динамику и масштаб распространения в период начального этапа пандемии COVID-19. Авторы работ отмечают, что транспортные потоки внутри государств усиливали интенсивность распространения вируса из крупнейших аэропортов в другие регионы по оси «центр-периферия», а общественный транспорт в городах в дальнейшем способствовал локальному распространению вируса^{27 28 29}. Таким образом, сценарное прогнозирование на основе агентного подхода с учетом транспортного фактора при распространении вирусных инфекций, в частности гражданской авиации, может улучшить прогностические возможности моделирования.

В мировой и отечественной практике для прогнозирования распространения вирусных эпидемий и оценки их последствий активно применяются методы математического моделирования, находящиеся в стадии постоянного развития. Можно выделить следующие ключевые вызовы при разработке крупномасштабных моделей распространения инфекций:

1. выбор математического аппарата, способного учитывать комплекс разнородных факторов: скорость распространения инфекции; тяжесть течения заболевания; социальные и социально-экономические последствия для различных групп населения;
2. учёт гетерогенности населения (возрастные, социальные, географические различия) и особенностей передачи вирусов в различных средах (домохозяйства, транспорт, рабочие места);
3. обеспечение модели информационной базой, необходимой для ее отладки, верификации и калибровки при дефиците полных эмпирических данных;
4. создание программного обеспечения для реализации разработанной математической модели, включающей интеграцию региональных данных, оптимизацию вычислительных алгоритмов и переход к параллельным вычислениям с использованием суперкомпьютеров для масштабирования модели на национальный, макрорегиональный и глобальный уровни.

Методы и информационная база и исследования

Данная работа является продолжением исследования³⁰, в котором была представлена концепция большой агент-ориентированной эпидемиологической модели России СПЕКТР (Система Прогноза и Эпидемиологического Контроля Территорий России). Концепция обеспечивает создание конструкции эпидемиологической АОМ, реалистично имитирующей распространение в обществе инфекции, передающейся от человека к человеку воздушно-капельным путем. В концепции АОМ предложены механизмы, позволяющие в явном виде учитывать при имитации:

- особенности протекания конкретного инфекционного заболевания, вызвавшего эпидемию (контагиозность (заразность), длительность инкубационного периода, вероятность критического течения болезни и летального исхода; вероятность осложнений, влияющих на общее состояние здоровья человека и т. д.). Так, агенты-люди в модели после инфицирования проходят все стадии заболевания в соответствии с индивидуальным планом развития болезни, а также графиком перехода от одной стадии к другой в днях. Схема стадий заболевания расширена от стандартной SEIRD до TSEIHCRUD и учитывает как наличие естественного (у переболевших ранее) или искусственного (у вакцинированных) временного иммунитета, так и возможные осложнения после выздоровления, как показано на рисунке 1;
- неоднородность населения с точки зрения его восприимчивости к инфекции, связанная с местом жительства, личностными характеристиками, образом жизни людей и их готовностью следовать предписанным противоэпидемическим мерам;

- зависимость хода болезни человека от текущего состояния его здоровья;
- социальные связи отдельных людей, существенным образом влияющие на частоту контактов (место жительства, вид деятельности, семья и т. д.);
- контакты людей, связанные с их перемещением на транспорте. В модели воспроизводится структура транспортной сети России в виде графа, связывающего регионы через транспортные узлы (вершины графа) и перегоны между ними (ребра графа), причем, система эта открыта – то есть имеет смежные (связанные напрямую ребрами) узлы за пределами России. Это важно учитывать, так как инфекция может поступать извне, как это было, например, в период пандемии COVID-19.

12

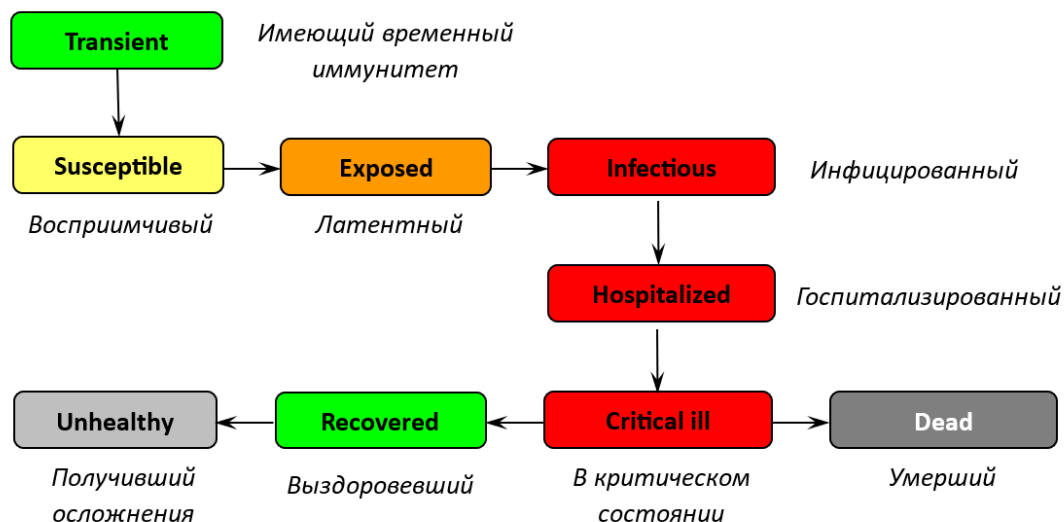


Рис. 1. Схема стадий TSEIHCARD протекания болезни у агентов в АОМ СПЕКТР.

13 В настоящей работе представлена уточненная агент-ориентированная эпидемиологическая модель России СПЕКТР, предназначенная для оценки эффективности планируемых противоэпидемических мер с учетом межрегиональной передачи вирусов при перемещении агентов-людей через ключевые транспортные коридоры. Модель реализуется в суперкомпьютерной версии.

14 Исходная модельная база. Создание суперкомпьютерной версии АОМ СПЕКТР осуществлялось на базе разработанной ранее в ЦЭМИ РАН системы проектирования масштабируемых агент-ориентированных моделей МЁБИУС³¹. Система МЁБИУС позволяет создавать АОМ, включающие популяции агентов разных типов с динамически изменяющейся численностью и сложными многоэтапными взаимодействиями агентов, образующих социальные сети. Система позволяет создавать эффективно масштабируемые агент-ориентированные модели с популяциями агентов разных типов общей численностью порядка 1 млрд агентов. В системе МЁБИУС была разработана большая демографическая АОМ России, включающая 146 млн агентов-людей, которая воспроизводит пространственное распределение населения России по регионам и имитирует процессы естественного движения населения, а также образование семейных связей и семей как особого вида агентов³².

¹⁵ Для добавления к демографическому ядру АОМ блока, имитирующего эпидемиологические процессы в соответствии с разработанной концепцией, требовалась модификация этого ядра – переход от имитации процессов с шагом, соответствующим одному году (что естественно для демографических моделей), к имитации с шагом в один день (что требуется для эпидемиологической модели).

¹⁶ Подчеркнем особенности разработки АОМ в суперкомпьютерном варианте. Так, реализованные в модели алгоритмы имитации процессов можно представить в виде блок-схемы выполняемых на каждом шаге последовательных этапов. Например, в начале шага имитации может понадобиться этап расчета региональных характеристик, которые затем будут учитываться в имитации поведения агентов-жителей региона на следующем этапе. Но цель использования суперкомпьютера в агент-ориентированном моделировании – это экономия времени выполнения программы за счет одновременного (параллельного) выполнения действий различными агентами на разных процессорах суперкомпьютера. Переходить к выполнению следующего блока алгоритма невозможно, пока не завершен расчет для всех агентов. Поэтому в рамках алгоритма определены точки синхронизации, в которых требуется ожидание агентов, уже завершивших свои действия, пока не завершат все остальные. Чем равномернее распределены агенты по процессорам, тем меньше время ожидания в точке синхронизации, и такое распределение агентов обеспечивает система МЁБИУС. В точке синхронизации происходит сбор статистики по популяции агентов и/или их групп на первом процессоре, а также может потребоваться обмен сообщениями между агентами, в которых они информируют заинтересованных адресатов о своих действиях и/или изменениях состояний.

¹⁷ В демографической АОМ России последовательность этапов алгоритма, выполняемых средой агентов и самими агентами перед шагом и на шаге имитации (вместе с предусмотренными точками синхронизации) была выстроена для шага в один год, что соответствует периодичности обновления используемых в модели статистических данных (коэффициенты смертности, суммарный коэффициент рождаемости, сумма материнского капитала, стоимость квадратного метра жилья в регионах и т.д.). Поэтому эти данные и в модели актуализировались на каждом шаге. При имитации с шагом один день этого не требуется, поэтому такой этап перерасчета на каждом шаге был убран, а распределение, кому из агентов и в какой день в течение года умереть, а кому родить (создать) нового агента, теперь производится при установке стартового состояния. Что позволило при тех же параметрах эксперимента сократить время расчета на шаге примерно в три раза.

¹⁸

Методический подход к учету прохождения агентов по транспортной инфраструктуре как каналу распространения вирусов

В эпидемиологическом блоке модели распространения эпидемии был разработан механизм имитации передачи инфекции через взаимодействие людей в процессе прохождения людских потоков по ребрам транспортного графа к его вершинам – населенным пунктам. Среди населения самих населенных пунктов инфекция должна распространяться внутри групп общения агентов. Такой двухуровневый подход аналогичен подходу, реализованному в глобальной модели, разработанной

для имитации пандемий³³. Отметим, что вероятность заражения для здоровых агентов существенно выше при длительном нахождении с инфицированным агентом в замкнутом пространстве, чем при случайном контакте с ним в городе. Так, можно найти описание практического случая, когда один инфицированный гриппом пациент посетил многолюдное общественное мероприятие в отделении крупной городской больницы, где несмотря на относительно низкий показатель контагиозности для гриппа, произошло заражение 18 человек из 70 присутствовавших³⁴. Поэтому необходим механизм формирования таких временных групп агентов, находящихся одновременно в узлах транспортной инфраструктуры и/или в салоне одного транспортного средства.

¹⁹ Решение подобной задачи в общем виде для всех видов транспорта требует огромных трудозатрат и огромного массива детализированных исходных данных, которые недоступны в открытых источниках. Для обеспечения максимально близкого приближения моделируемой ситуации к реальной действительности при создании прототипа эпидемиологической АОМ России для тестового примера была выбрана пандемия COVID-19, так как есть информация из достаточно надежных открытых источников, касающаяся как характеристик вызвавшего пандемию коронавируса SARS-CoV-2 и особенностей протекания заболевания, так и характеристик пассажиропотоков между регионами.

²⁰

Информационная база для транспортного блока модели

В качестве ключевых транспортных коридоров по распространению вирусов на территории России был выбран воздушный транспорт. В модели в качестве «ворот заражения» были приняты 103 гражданских аэропорта в городах России, через которые наиболее вероятно проникновение новых патогенов.

²¹ Процесс отбора пригодных для целей моделирования эмпирических данных по перевозкам пассажиров включал несколько этапов: а) данные по пассажиропотоку в России в разрезе международных и российских авиарейсов; б) сбор данных пассажиропотока по каждому месяцу 2019 и 2020 гг. в разрезе аэропортов в городах России; в) сбор данных по пассажиропотоку по аэропортам Московского авиаузла (Шереметьево, Домодедово, Внуково) в разрезе международного и внутрироссийского сообщения по годам, ежемесячно внутри 2019 и 2020 годов. В условиях отсутствия указанной выше информации в базе данных и сводных таблицах Росстата и Федерального агентства воздушного транспорта (Росавиация) был проведен детальный поиск по документам Министерства транспорта Российской Федерации (отчетам, бюллетеням и др.), ежемесячным бюллетеням и пресс-релизам Росавиации, годовым и квартальным отчетам и пресс-релизам отдельных аэропортов России.

²² Для учета транспортного фактора в модели были собраны реальные эмпирические данные по перевозкам пассажиров в России в разрезе 103 аэропортов, которые позволили провести сравнительный анализ до- и пандемийного периодов, количественно оценить влияние ограничений на динамику распространения, учесть сезонную вариативность авиaperевозок (летние пики, январские спады), карту авиамаршрутов по России. В рамках модели

учитывались годовые и помесечные данные за период январь 2019 г – декабрь 2020 г. перевозок пассажиров международными и российскими авиарейсами в разрезе перевозок пассажиров по аэропортам России и отдельно по аэропортам Московского авиаузла (Шереметьево, Домодедово, Внуково).

²³ В результате авторами исследования была сформирована уникальная база достоверных данных по перевозкам пассажиров через 103 аэропорта России в 2019 и 2020 годах для моделирования сценариев распространения вирусных инфекций с разрешением до уровня аэропорта и дальнейшего распространения через имитацию перемещения агентов в пространстве.

²⁴

Результаты исследования

По результатам анализа сформированной авторами исследования базы данных, основанной на официальных источниках информации, показана динамика обслуживания пассажиров аэропортами Московского авиационного узла (МАУ) в 2019–2020 годах с разделением на международные и внутренние перевозки (рисунок 2)³⁵. На рисунке 2 видно катастрофическое падение объемов перевозок пассажиров в 2020 году, вызванное противоэпидемическими ограничениями, особенно ограничениями на сообщения с зарубежными странами, постепенно вводимыми с начала марта и достигшими прекращения регулярных рейсов с другими странами 26 марта 2020 года³⁶. Некоторое послабление ограничительных мер началось 8 июня с открытия выезда за границу на работу, учебу и лечение, а с 1 августа началось постепенное снятие ограничений на международные полеты³⁷.

²⁵

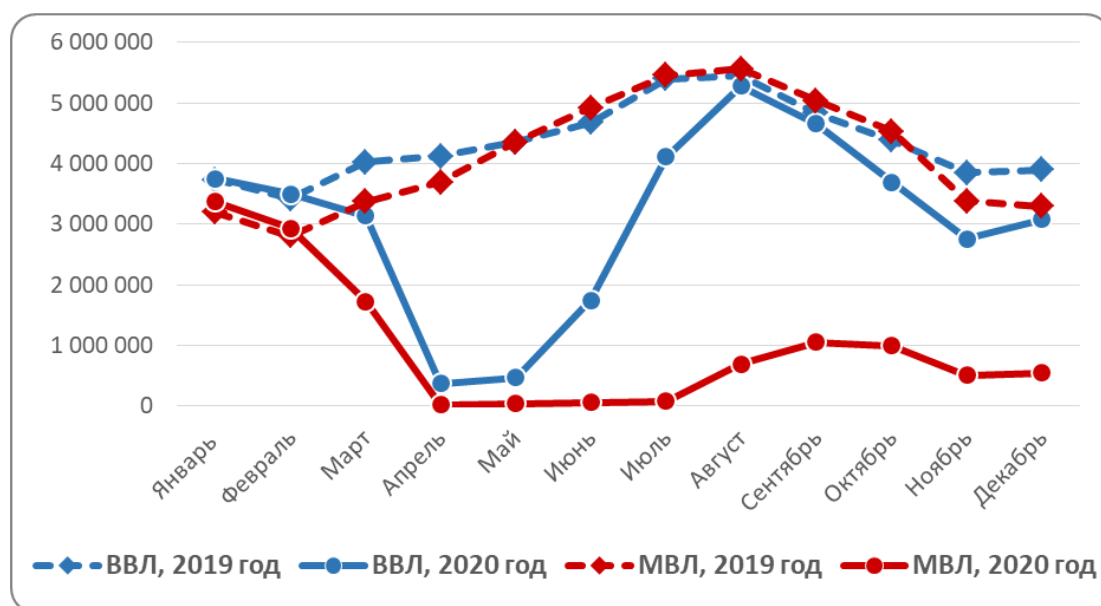


Рис. 2. Сопоставление динамики обслуживания пассажиров аэропортами Московского авиационного узла в 2019–2020 гг. (отправлено + прибыло), чел.

²⁶

1. Разработаны методологические подходы для учета транспортной проходимости аэропортов в условиях пандемии. С учетом наличия достаточно подробной информации для МАУ как для периода нормального функционирования, так и для периода пандемии, а также того, что доля МАУ в общем объеме пассажиропотока российских аэропортов в 2019 году составила

около 46% (например, только из Шереметьево ежедневно вылетает 351 рейс в 69 аэропортов России), мы выбрали именно этот крупнейший транспортный узел для центрального объекта моделирования в прототипе большой эпидемиологической модели России. Кроме того, для Московского авиационного узла с тремя его аэропортами – Шереметьево, Домодедово и Внуково, основываясь на их расписании рейсов, можно рассчитать ежедневную численность вылетающих и прибывающих пассажиров, а также мощность пассажиропотоков с теми региональными аэропортами, с которыми имеется прямое сообщение. Такие данные позволяют создать механизм формирования групп агентов, находящихся одновременно в салоне самолета каждого рейса. Здесь важно подчеркнуть то, что агент-ориентированный подход предполагает, что это будут именно группы индивидуализированных агентов, вероятность заражения каждого из которых будет зависеть, в том числе, от уровня его здоровья, а скорость дальнейшего распространения им инфекции – от масштаба его личных связей, а также от плотности населения в пункте его назначения. Механизм формирования групп агентов-путешественников реализуется через раздачу агентам «билетов» на определенную дату в течение года и на конкретный рейс. И этот процесс реализуется на этапе установки стартового состояния системы. При этом делается ряд допущений, таких как:

- зарубежные страны не разделяются, а считаются одним пунктом назначения/вылета;
- число вылетов в направлении каждого аэропорта из аэропортов МАУ равно числу прилетов из этих аэропортов;
- загрузка каждого рейса равна средней по всем рейсам для этого месяца по данному аэропорту МАУ.

²⁷ Затем при пошаговой имитации в соответствующий день агент реализует свой «билет», если его рейс не отменен в результате ограничительных мер, а сам агент к этому времени жив и не находится в изоляции.

²⁸ На рисунке 3 показана схема передачи инфекции от зараженного агента к окружающим по мере его перемещения во время путешествия из-за рубежа. В модели часть агентов, прибывающих в МАУ из-за рубежа, остаются в Москве, а часть следует другими рейсами в регионы, что и отражено на схеме. Также на схеме видно, что агент не заражает семью, пока находится в отъезде.

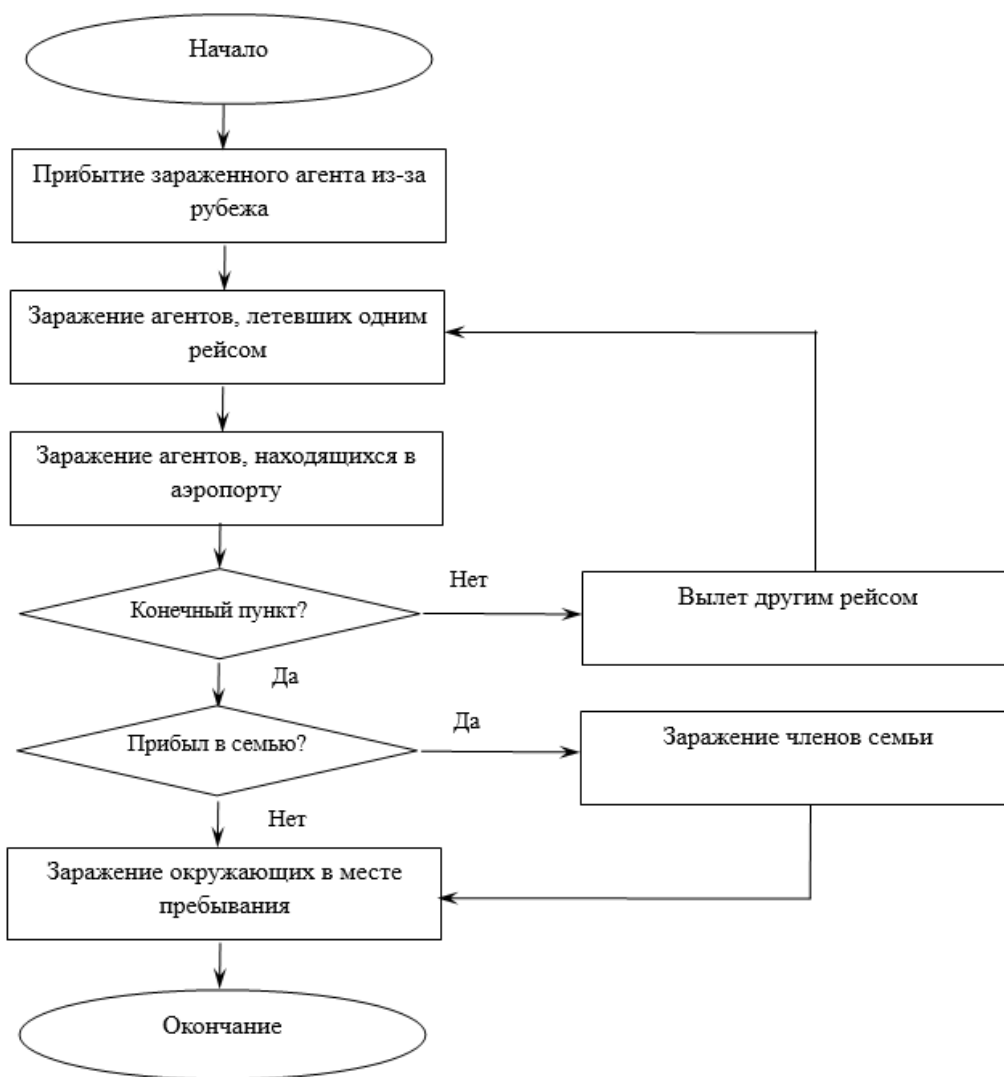


Рис. 3. Схема распространения инфекции от зараженного агента по возвращении его из-за рубежа.

2. Расширен перечень свойств агентов и усложнена структура их среды. Для реализации эпидемиологического блока потребовалось расширение как свойств агентов, так и структуры их среды, в том числе, модификация существующих классов, создание новых классов объектов, а также создание новых процедур. При этом надо было учесть то, что статистика о заболеваемости в модели собирается по регионам, а на территории региона может находиться несколько аэропортов в разных городах. Например, на территории Ямало-Ненецкого автономного округа аэропорты имеются в Надыме (рейсы из Домодедово и Внуково), в Новом Уренгое (Домодедово, Шереметьево) и в Салехарде (Домодедово, Шереметьево). В то же время есть Москва с тремя аэропортами, расположенными далеко друг от друга, то есть, пассажиры рейсов в основном замкнуты в пределах соответствующего аэропорта.

Структура эпидемиологического блока

Развитие класса «Агент». Добавлены характеристики: состояние здоровья по шкале из пяти уровней³⁸; дата рождения агента-ребенка; дата смерти агента; расписание поездок; план заболевания; лояльность (готовность выполнять требования вводимых противоэпидемических мер); признак нахождения в изоляции; местоположение; вектор счетчиков длительности стадий заболевания в соответствии со схемой TSEIHCRUD, а также указатель на текущую стадию. Кроме того, добавлены процедуры: а) ухудшения общего состояния здоровья с возрастом; б) разработки плана заболевания.

³² В классе «Регион» добавлена коллекция (список) городов на его территории, в которых имеются аэропорты, связанные с МАУ.

³³ В главном классе «Main» добавлены процедуры: а) разработки плана поездки для агента (оформление «билетов» туда и обратно); б) сбора статистики по показателям, характеризующим динамику эпидемии – численности групп агентов, находящихся на разных стадиях заболевания как для регионов, так и для России в целом.

³⁴ Новые классы:

1. «Инфекция». Характеристики: код; название; индекс контагиозности (вероятность заражения при контакте с больным); доля болеющих легко; вероятность осложнений (ухудшения общего уровня здоровья); уровень смертности; распределение интервалов длительности в днях по стадиям заболевания.
2. «Рейс». Характеристики: дата; аэропорты отправления и прилета; номер рейса; общее число мест; число свободных мест; коллекция агентов-пассажиров.
3. «Аэропорт». Характеристики: код; название; код города; численность работников; счетчик закрытия воздушного сообщения в днях; коллекция рейсов.
4. «Город». Характеристики: код; название; код региона; численность населения; коллекция аэропортов.
5. «Управляющее противоэпидемическое воздействие» – «Мера». Характеристики: тип (например, карантин); код; название; дата введения; дата отмены; признак активности; условие выбора объектов и/или агентов, на которых мера распространяется (например, отдельный регион или город, отрасль или возраст агентов).

³⁵ Выходные показатели эпидемиологической АОМ, рассчитываемые на каждом шаге имитации для каждого региона и по стране в целом и сохраняемые во внешних файлах, образуют вектор распределения населения по группам, находящимся на разных стадиях заболевания в соответствии со схемой TSEIHCRUD. Что позволяет затем анализировать динамику эпидемиологической обстановки при разных условиях экспериментов.

³⁶

Заключение

По результатам проведения исследования была усовершенствована агент-ориентированная эпидемиологическая модель России СПЕКТР. В отличие от ранее разработанных моделей, оперирующих условными данными для транспортных потоков, авторами исследования впервые предложен новый методический подход к учету транспортных коридоров как каналов распространения вирусов в агент-ориентированной эпидемиологической модели на основе фактических данных помесечной динамики перевозок пассажиров по 103 аэропортам России за период 2019-2020 годы, которые точно отражают пассажиропоток до и во время пандемии.

³⁷ В результате изменения архитектуры модели были существенно расширены ее функциональные блоки и добавлены новые классы объектов; уточнены алгоритмы взаимосвязей между агентами; разработан алгоритм имитации распространения эпидемии через взаимодействия агентов-людей, которые воспроизводятся на реальной социально-демографической структуре населения, учитывающей социальные связи каждого агента и его перемещение по транспортной сети. Агентный подход позволил отразить в разработанной модели в явном виде прямые и обратные связи между различными процессами, например, ухудшение уровня здоровья у переболевших агентов, что при повторном заражении увеличивает вероятность тяжелого течения заболевания.

³⁸ Таким образом, предложенная усовершенствованная агент-ориентированная эпидемиологическая модель России СПЕКТР может быть использована для запуска на суперкомпьютерах для оценки эффективности планируемых противоэпидемических мер с учетом межрегиональной передачи вирусов при перемещении агентов-людей через ключевые транспортные коридоры. На наш взгляд, предложенная модель может стать одним из элементов системы поддержки принятия решений в рамках ситуационных центров России для оценки влияния ограничений на динамику распространения эпидемий.

Примечания:

1. Соглашение ВОЗ по борьбе с пандемиями // URL: [>>>>](#)
2. Kang J.Y., Aldstadt J. Using multiple scale space-time patterns in variance-based global sensitivity analysis for spatially explicit agent-based models // Computers, environment and urban systems. 2019, 75, 170-183. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2019.02.006.
3. Perez L., Dragicevic S. An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread // International journal of health geographics. 2009, 8(1), 50. DOI: 10.1186/1476-072X-8-50.
4. Zhu K. et al. Generating synthetic population for simulating the spatiotemporal dynamics of epidemics // PLOS Computational Biology. 2024, 20(2), p.e1011810. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1011810.
5. Truszkowska A. et al. High-resolution agent-based modeling of COVID-19 spreading in a small town // Advanced theory and simulations. 2021, 4(3), 2000277. DOI: 10.1002/adts.202000277.
6. Silva P. C. et al. COVID-ABS: An agent-based model of COVID-19 epidemic to simulate health and economic effects of social distancing interventions // Chaos, Solitons & Fractals. 2020, 139, 110088. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110088.
7. Syrowatka A. et al. Leveraging artificial intelligence for pandemic preparedness and response: a scoping review to identify key use cases // NPJ digital medicine. 2021, 4(1), 96. DOI: 10.1038/s41746-021-00459-8.
8. Krivorotko O. et al. Agent-based modeling of COVID-19 outbreaks for New York state and UK: Parameter identification algorithm // Infectious Disease Modelling. 2022, 7(1), 30-44. DOI: 10.1016/j.idm.2021.11.004.
9. Ferguson N.M. et al. Strategies for mitigating an influenza pandemic // Nature. 2006, 442(7101), 448-452. DOI:

10. Kraemer M.U. et al. Artificial intelligence for modelling infectious disease epidemics // *Nature*. 2025, 638(8051), 623-635. DOI: 10.1038/s41586-024-08564-w. Epub 2025 Feb 19. PMID: 39972226; PMCID: PMC11987553.
11. McCabe R. et al. Communicating uncertainty in epidemic models // *Epidemics*. 2021, 37, 100520. DOI: 10.1016/j.epidem.2021.100520.
12. Parker J., Epstein J.M. A distributed platform for global-scale agent-based models of disease transmission // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*. 2011, 22(1), 1-25. DOI: 10.1145/2043635.2043637.
13. Bedson J. et al. A review and agenda for integrated disease models including social and behavioural factors // *Nature human behaviour*. 2021, 5(7), 834-846. DOI: 10.1038/s41562-021-01136-2.
14. Epstein J.M. Inverse generative social science: Backward to the future // *Journal of artificial societies and social simulation: JASSS*. 2023, 26(2), 9. DOI: 10.18564/jasss.5083.
15. Pellis L., Cauchemez S., Ferguson N.M. and Fraser C. Systematic selection between age and household structure for models aimed at emerging epidemic predictions // *Nature communications*. 2020, 11(1), 906. DOI: 10.1038/s41467-019-14229-4.
16. Hinch R. et al. OpenABM-Covid19—An agent-based model for non-pharmaceutical interventions against COVID-19 including contact tracing // *PLoS computational biology*. 2021, 17(7), e1009146. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1009146.
17. Ferretti L. et al. Digital measurement of SARS-CoV-2 transmission risk from 7 million contacts // *Nature*. 2024, 626(7997), 145-150. DOI: 10.1038/s41586-023-06952-2.
18. Kerr C.C. et al. Covasim: an agent-based model of COVID-19 dynamics and interventions // *PLOS Computational Biology*. 2021, T. 17. №. 7. С. e1009149.
19. Matsvay A. et al. Genomic epidemiology of SARS-CoV-2 in Russia reveals recurring cross-border transmission throughout 2020 // *Plos one*. 2023, 18(5), e0285664. DOI 10.1371/journal.pone.0285664.
20. Komissarov A.B. et al. Genomic epidemiology of the early stages of the SARS-CoV-2 outbreak in Russia // *Nature communications*. 2021, 12(1), 649. DOI 10.1038/s41467-020-20880-z.
21. Власов В.В. и др. Математическое моделирование заболеваемости COVID-19 в Москве с применением агентной модели // *Дискретный анализ и исследование операций*. 2023, Т. 30. №. 2. С. 15-47. DOI 10.33048/daio.2023.30.761.
22. Тараник А.В. и др. Прогноз развития эпидемической ситуации COVID-19 в Москве в 2022-2023 годах // *International Journal of Open Information Technologies*. 2023, Т. 11. №. 2. С. 8-15.
23. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Агеева А.Ф. Моделирование эпидемии COVID-19-преимущества агент-ориентированного подхода // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2020, Т. 13. №. 4. С. 58-73. DOI: 10.15838/esc.2020.4.70.3.
24. Krivorotko O., Kabanikhin S. Artificial intelligence for COVID-19 spread modeling // *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*. 2024, 32(2), pp.297-332. DOI 10.1515/jiip-2024-0013.
25. Балута В.И., Берберова М.А., Судаков В.А., Милаев А.В. Вариант мультиагентной модели городской среды для исследования эпидемических процессов // *Цифровая экономика*. 2022, № 3(19). С. 77-87. DOI 10.34706/DE-2022-03-10.
26. Балута В.И., Осипов В.П., Сивакова Т.В. Технология комплексного моделирования эпидемиологической обстановки // *Научный сервис в сети Интернет*. 2020, Т. 22. С. 68-79. DOI: 10.20948/abrau-2020-51.
27. Du Z. et al. Risk for transportation of coronavirus disease from Wuhan to other cities in China // *Emerging infectious diseases*. 2020. Т. 26. №. 5. С. 1049.
28. Xu X. K. et al. Assessing the spread risk of COVID-19 associated with multi-mode transportation networks in China // *Fundamental Research*. 2023. Т. 3. №. 2. С. 305-310.
29. Tian H. et al. An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in China // *Science*. 2020. Т. 368. №. 6491. С. 638-642.
30. Бахтизин А.Р., Макаров В.Л., Отмахова Ю.С., Сушко Е.Д. Агент-ориентированные модели эпидемий: международные тренды и реализация в российской практике // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2025, Т. 18. № 5. С. 79–97. DOI: 10.15838/esc.2025.5.101.4.
31. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. Система проектирования масштабируемых агент-ориентированных моделей, включающих популяции агентов разных типов с динамически изменяющейся численностью и сложными многоэтапными взаимодействиями агентов, образующих социальные сети. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020612410, 20.02.2020.
32. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. Создание суперкомпьютерной имитации общества с

активными агентами разных типов и её апробация // Вестник Российской академии наук. 2022, Том 92, № 5. С. 458-466. DOI: 10.31857/S0869587322050115.

33. Ajelli M. et al. Comparing large-scale computational approaches to epidemic modeling: agent-based versus structured metapopulation models // BMC infectious diseases. 2010, 10(1), 190. DOI:10.1186/1471-2334-10-190.

34. Что такое контагиозность инфекции // URL: [>>>>](#)

35. AviaStat. Перевозка пассажиров через аэропорты России в 2020 году // URL: [>>>>](#)

36. Поручение Правительства РФ от 26.03.2020 "О решениях по итогам заседания президиума Координационного совета при Правительстве Российской Федерации по борьбе с распространением новой коронавирусной инфекции на территории Российской Федерации" // URL: [>>>>](#)

37. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27.07.2020 № 22 "О внесении изменений в постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 18.03.2020 № 7 и от 30.03.2020 № 9" // URL: [>>>>](#)

38. ЕМИСС. Численность детей в возрасте от 0 до 17 лет (включительно), прошедших профилактические осмотры, и их распределение по группам здоровья // URL: [>>>>](#)

Библиография:

1. Балута В.И., Берберова М.А., Судаков В.А., Милаев А.В. Вариант мультиагентной модели городской среды для исследования эпидемических процессов // Цифровая экономика. 2022, № 3(19). С. 77-87. DOI 10.34706/DE-2022-03-10.

2. Балута В.И., Осипов В.П., Сивакова Т.В. Технология комплексного моделирования эпидемиологической обстановки // Научный сервис в сети Интернет. 2020, Т. 22. С. 68-79. DOI: 10.20948/abrau-2020-51.

3. Бахтизин А.Р., Макаров В.Л., Отмахова Ю.С., Сушко Е.Д. Агент-ориентированные модели эпидемий: международные тренды и реализация в российской практике // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2025, Т. 18, № 5. С. 79–97. DOI: 10.15838/esc.2025.5.101.4.

4. Власов В.В. и др. Математическое моделирование заболеваемости COVID-19 в Москве с применением агентной модели // Дискретный анализ и исследование операций. 2023, Т. 30. №. 2. С. 15-47. DOI 10.33048/daio.2023.30.761.

5. ЕМИСС. Численность детей в возрасте от 0 до 17 лет (включительно), прошедших профилактические осмотры, и их распределение по группам здоровья // URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/60983>.

6. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Агеева А.Ф. Моделирование эпидемии COVID-19-преимущества агент-ориентированного подхода // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020, Т. 13, №. 4. С. 58-73. DOI: 10.15838/esc.2020.4.70.3.

7. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. Система проектирования масштабируемых агент-ориентированных моделей, включающих популяции агентов разных типов с динамически изменяющейся численностью и сложными многоэтапными взаимодействиями агентов, образующих социальные сети. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020612410, 20.02.2020.

8. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. Создание суперкомпьютерной имитации общества с активными агентами разных типов и её апробация // Вестник Российской академии наук. 2022, Том 92, № 5. С. 458-466. DOI: 10.31857/S0869587322050115.
9. Поручение Правительства РФ от 26.03.2020 "О решениях по итогам заседания президиума Координационного совета при Правительстве Российской Федерации по борьбе с распространением новой коронавирусной инфекции на территории Российской Федерации" // URL: <http://government.ru/orders/selection/401/39276/>.
10. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27.07.2020 № 22 "О внесении изменений в постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 18.03.2020 № 7 и от 30.03.2020 № 9" // URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202007310061>.
11. Соглашение ВОЗ по борьбе с пандемиями // URL: https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA78/A78_10-ru.pdf.
12. Тараник А.В. и др. Прогноз развития эпидемической ситуации COVID-19 в Москве в 2022-2023 годах // International Journal of Open Information Technologies. 2023, Т. 11. №. 2. С. 8-15.
13. Что такое контагиозность инфекции // URL: https://profsc.ru/blog/что-такое-kontagioznost-infektsii/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F.
14. Ajelli M. et al. Comparing large-scale computational approaches to epidemic modeling: agent-based versus structured metapopulation models // BMC infectious diseases. 2010, 10(1), 190. DOI:10.1186/1471-2334-10-190.
15. AviaStat. Перевозка пассажиров через аэропорты России в 2020 году // URL: <https://www.aviastat.ru/statistics/72-perevozka-passazhirov-cherez-aeroporty-rossii-v-2020-godu>.
16. Bedson J. et al. A review and agenda for integrated disease models including social and behavioural factors // Nature human behaviour. 2021, 5(7), 834-846. DOI: 10.1038/s41562-021-01136-2.
17. Du Z. et al. Risk for transportation of coronavirus disease from Wuhan to other cities in China // Emerging infectious diseases. 2020. Т. 26. №. 5. С. 1049.
18. Epstein J.M. Inverse generative social science: Backward to the future // Journal of artificial societies and social simulation: JASSS, 2023, 26(2), 9. DOI: 10.18564/jasss.5083.
19. Ferguson N.M. et al. Strategies for mitigating an influenza pandemic // Nature. 2006, 442(7101), 448-452. DOI: 10.1038/nature04795.

20. Ferretti L. et al. Digital measurement of SARS-CoV-2 transmission risk from 7 million contacts // *Nature*. 2024, 626(7997), 145-150. DOI: 10.1038/s41586-023-06952-2.
21. Hinch R. et al. OpenABM-Covid19—An agent-based model for non-pharmaceutical interventions against COVID-19 including contact tracing // *PLoS computational biology*. 2021, 17(7), e1009146. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1009146.
22. Kang J.Y., Aldstadt J. Using multiple scale space-time patterns in variance-based global sensitivity analysis for spatially explicit agent-based models // *Computers, environment and urban systems*. 2019, 75, 170-183. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2019.02.006.
23. Kerr C.C. et al. Covasim: an agent-based model of COVID-19 dynamics and interventions // *PLOS Computational Biology*. 2021, Vol. 17. №. 7. C. e1009149.
24. Komissarov A. B. et al. Genomic epidemiology of the early stages of the SARS-CoV-2 outbreak in Russia // *Nature communications*. 2021, 12(1), 649. DOI 10.1038/s41467-020-20880-z.
25. Kraemer M.U. et al. Artificial intelligence for modelling infectious disease epidemics // *Nature*. 2025, 638(8051), 623-635. DOI: 10.1038/s41586-024-08564-w. Epub 2025 Feb 19. PMID: 39972226; PMCID: PMC11987553.
26. Krivorotko O., Kabanikhin S. Artificial intelligence for COVID-19 spread modeling // *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*. 2024, 32(2), pp.297-332. DOI 10.1515/jiip-2024-0013.
27. Krivorotko O. et al. Agent-based modeling of COVID-19 outbreaks for New York state and UK: Parameter identification algorithm // *Infectious Disease Modelling*. 2022, 7(1), 30-44. DOI: 10.1016/j.idm.2021.11.004.
28. Matsvay A. et al. Genomic epidemiology of SARS-CoV-2 in Russia reveals recurring cross-border transmission throughout 2020 // *Plos one*. 2023, 18(5), e0285664. DOI 10.1371/journal.pone.0285664.
29. McCabe R. et al. Communicating uncertainty in epidemic models // *Epidemics*. 2021, 37, 100520. DOI: 10.1016/j.epidem.2021.100520.
30. Parker J., Epstein J.M. A distributed platform for global-scale agent-based models of disease transmission // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*. 2011, 22(1), 1-25. DOI: 10.1145/2043635.2043637.
31. Pellis L., Cauchemez S., Ferguson N.M., Fraser C. Systematic selection between age and household structure for models aimed at emerging epidemic predictions // *Nature communications*. 2020, 11(1), 906. DOI: 10.1038/s41467-019-14229-4.
32. Perez L., Dragicevic S. An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread // *International journal of health geographics*. 2009, 8(1), 50.

DOI: 10.1186/1476-072X-8-50.

33. Silva P.C. et al. COVID-ABS: An agent-based model of COVID-19 epidemic to simulate health and economic effects of social distancing interventions // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020, 139, 110088. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110088.

34. Syrowatka A. et al. Leveraging artificial intelligence for pandemic preparedness and response: a scoping review to identify key use cases // *NPJ digital medicine*. 2021, 4(1), 96. DOI: 10.1038/s41746-021-00459-8.

35. Tian H. et al. An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in China // *Science*. 2020. T. 368. №. 6491. C. 638-642.

36. Truszkowska A. et al. High-resolution agent-based modeling of COVID-19 spreading in a small town // *Advanced theory and simulations*. 2021, 4(3), 2000277. DOI: 10.1002/adts.202000277.

37. Xu X.K. et al. Assessing the spread risk of COVID-19 associated with multi-mode transportation networks in China // *Fundamental Research*. 2023. T. 3. №. 2. C. 305-310.

38. Zhu K. et al. Generating synthetic population for simulating the spatiotemporal dynamics of epidemics // *PLOS Computational Biology*. 2024, 20(2), p.e1011810. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1011810.

Agent-based Epidemiological Model SPECTRUM for Studying the Impact of Transport Corridors on the Spread of Viral Infections

Albert Bakhtizin

*Central Economics and Mathematics Institute, RAS
Russian Federation, Moscow*

Valery Makarov

*Central Economics and Mathematics Institute, RAS
Russian Federation, Moscow*

Yulia Otmakhova

*Central Economics and Mathematics Institute, RAS
Russian Federation, Moscow*

Elena Sushko

*Central Economics and Mathematics Institute, RAS
Russian Federation, Moscow*

Abstract

The paper presents an improved agent-based epidemiological model for Russia, called SPECTRUM. This model is designed to assess the effectiveness of planned anti-epidemic measures by taking into account the interregional transmission of viruses through the movement of people along key transport corridors. The developed model simulates the processes of person-to-person infection transmission, which are based on the real socio-demographic structure of the population. It also takes into account social connections and the spatial distribution of people. Within the supercomputer implementation of the model, a large number of complex agents are created with detailed health properties. This allows for the creation of a realistic representation of the distribution of groups of people at different stages of disease caused by the epidemic. To take into account the transport factor in the spread of infections, we have added new classes of objects to the model: "Infection", "Flight", "Airport", "City", and "Managing anti-epidemic measures". The agent-based approach allows us to explicitly reflect the direct and indirect relationships between various processes in the developed model. For example, it takes into account the deterioration of the health level of infected agents, which can lead to a more severe course of disease upon reinfection. For modeling purposes, we used a real empirical dataset for the first time. It is based on actual data on monthly passenger traffic at 103 Russian airports for the period from 2019 to 2020. This dataset accurately reflects the dynamics of passenger traffic both before and during the pandemic. This increases the accuracy of our computational experiments and makes them more reliable. The paper proposes a new methodological approach to considering transport corridors as potential virus transmission channels in agent-based epidemiological models. This proposed model could be integrated into a decision support system for Russian situational centers, assisting in assessing the impact of restrictions on epidemic spread dynamics.

Keywords: epidemic modeling, spatial spread of viruses, transport corridors, agent-based models, recreation of social and spatial structure in an artificial society, agent behavior, virus transmission, computational experiments on models of social processes, information technologies for intelligent decision support

Date of publication: 23.12.2025

Citation link:

Bakhtizin A., Makarov V., Otmakhova Y., Sushko E. Agent-based Epidemiological Model SPECTRUM for Studying the Impact of Transport Corridors on the Spread of Viral Infections // Artificial societies. 2025. Vol. 20. Issue 4.
URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800037165-0-1/> DOI: 10.18254/S207751800037165-0

Код пользователя: 0; Дата выгрузки: 07.07.2026; URL - <http://artsoc.jes.su/s207751800037165-0-1/> Все права защищены.