
НАУКА И ПРАКТИКА

Научный обзор

<https://doi.org/10.36233/0372-9311-130>

Разработка программных инструментов, основанных на мультиагентном моделировании и реализованных в геоинформационной системе нового поколения, для решения эпидемиологических задач

Асатрян М.Н.^{1✉}, Герасимук Э.Р.², Струков Д.Р.³, Шмыр И.С.¹, Вехов А.О.³, Ершов И.Ф.¹, Лабодин А.В.³, Ноздрачева А.В.¹, Семенов Т.А.¹, Народицкий Б.С.¹, Пронин А.В.¹

¹Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии им. почётного академика Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия;

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Московская область, Россия;

³Центр Пространственных исследований, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Цель работы — демонстрация возможностей программных инструментов, основанных на мультиагентном моделировании и реализованных в геоинформационной системе нового поколения, для решения эпидемиологических задач (на примере распространения кори в мегаполисе).

Материалы и методы. Приведены примеры использования тематических слоёв и функционала геоинформационной платформы, а также разработанной мультиагентной модели распространения кори в мегаполисе. Модель распространения кори представлена в виде 3 независимых подмоделей: модели поведения популяции, модели инфицирования и модели инфекционного процесса. Модульность и независимость подмоделей позволяют использовать необходимые статистические и клинические данные — как относящиеся непосредственно к изучаемому заболеванию, так и демографические показатели, которые анализируются и хранятся в тематических слоях платформы.

Результаты. Разработанные программные инструменты позволяют визуализировать и проводить анализ распространения заболевания на изучаемой территории с возможностью формирования отчетов, что может быть полезным и актуальным дополнением в повседневной работе специалистов, способствовать совершенствованию и углублению практических навыков и умений в соответствии с видами и задачами профессиональной деятельности, а также расширить возможности для помощи в принятии управленческих решений.

Ключевые слова: математическое моделирование, агентная модель, геоинформационные системы, прогнозирование, визуализация, пространственный анализ, эпидемиологические задачи, эпидемиологический процесс, инфекционный процесс, корь, управленческие решения

Благодарности. Выражаем особую признательность старшему научному сотруднику отдела эпидемиологии НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи О.Г. Николаевой, сотрудникам компании «Геоинтеллект» А.А. Панову, А.А. Дубровскому, Е.А. Пустоваловой, А.С. Чигиновой за постоянную помощь, консультации в процессе выполнения работы. Также выражаем искреннюю благодарность сотрудникам Центра им. Н.Ф. Гамалеи Е.А. Домогааровой и О.В. Шипиловой за проделанную работу и поддержку при подготовке исследований.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы А.О. Вехов, А.В. Лабодин являются штатными сотрудниками компании-разработчика, осуществляющей распространение продукта на территории РФ, а автор Д.Р. Струков — её генеральным директором.

Для цитирования: Асатрян М.Н., Герасимук Э.Р., Струков Д.Р., Шмыр И.С., Вехов А.О., Ершов И.Ф., Лабодин А.В., Ноздрачева А.В., Семенов Т.А., Народицкий Б.С., Пронин А.В. Разработка программных инструментов, основанных на мультиагентном моделировании и реализованных в геоинформационной системе нового поколения, для решения эпидемиологических задач. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2021;98(4):468–480.

DOI: <https://doi.org/10.36233/0372-9311-130>

Development of software tools based on multi-agent modeling and implemented in the new generation geographic information system for solving epidemiological problems

Marina N. Asatryan¹✉, Elita R. Gerasimuk², Denis R. Strukov³, Ilya S. Shmyr¹, Aleksey O. Vekhov³, Ivan F. Ershov¹, Andrey V. Labodin³, Anna V. Nozdracheva¹, Tatiana A. Semenenko¹, Boris S. Naroditsky¹, Alexander V. Pronin¹

¹N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia;

²Dubna State University, Dubna, Moscow Region, Russia;

³Center for Spatial Researches LLC, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The **aim** of the study — demonstration of the capabilities of new generation geographic information system software and agent-based modeling for solving epidemiological problems (on the example of the spread of measles in a metropolis).

Materials and methods. Examples of the use of thematic layers and the functionality of the geoinformation platform, as well as the developed multi-agent model of measles spread in the megalopolis, are given. The measles spread model is presented as following three independent sub-models or nested models: behavior model, infection model, infectious process model. The modularity and independence of the sub-models allow the use of the necessary statistical and clinical data, both directly related to the studied disease and demographic indicators, which are analyzed and stored in the thematic layers of the platform.

Results. The developed software tools allow visualizing, analyzing and short-term forecasting of the spread of the disease in the study area, with the ability to generate reports, which can be a useful and relevant addition to the daily work of specialists, contribute to the improvement and deepening of practical skills and abilities, in accordance with the types and tasks of professional activities, as well as expand opportunities for assistance in management decision making.

Keywords: *mathematical modeling, agent-based model, geographic information systems, forecasting, visualization, spatial analysis, epidemiological tasks, epidemic process, infectious process, measles, management decisions*

Acknowledgement. We express our special gratitude to the senior researcher of the Epidemiology department, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology O.G. Nikolaeva, employees of the Geointellect company A.A. Panov, A.A. Dubrovsky, E.A. Pustovalova, A.S. Chigineva for constant help, advice in the process of doing the work. We also express our sincere gratitude to the staff of the N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology E.A. Domogarova and O.V. Shipilova for the work done and support in the preparation of the research.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Conflict of interest. Authors A.O. Vekhov, A.V. Labodin are full-time employees of a development company that distributes the product in the territory of the Russian Federation, and the author D.R. Strukov became its general director.

For citation: Asatryan M.N., Gerasimuk E.R., Strukov D.R., Shmyr I.S., Vekhov A.O., Ershov I.F., Labodin A.V., Nozdracheva A.V., Semenenko T.A., Naroditsky B.S., Pronin A.V. Development of software tools based on multi-agent modeling and implemented in the new generation geographic information systems for solving epidemiological problems. *Journal of microbiology, epidemiology and immunobiology = Zhurnal mikrobiologii, èpidemiologii i immunobiologii.* 2021;98(4):468–480.

DOI: <https://doi.org/10.36233/0372-9311-130>

Введение

Сезонный рост заболеваемости, возникновение вспышек и эпидемий инфекционных заболеваний, обусловленных как известными возбудителями, так и «новыми» патогенами, требуют своевременной организации противоэпидемических мероприятий со стороны различных структур и служб системы здравоохранения [1, 2]. В этих условиях важными составляющими для эффективного принятия решений являются оперативный анализ и прогноз эпи-

демиологической ситуации, которые могут быть обеспечены благодаря совершенствованию информационно-аналитического обеспечения [3–5].

Геоинформационные системы (ГИС) и математическое моделирование продолжают быть востребованными в качестве необходимого инструмента для решения многих задач в эпидемиологии и общественном здравоохранении [6, 7]. ГИС, как современная информационная технология для картирования и анализа объектов реального мира, объ-

единяет традиционные операции работы с базами данных с преимуществами полноценной визуализации и географического (пространственного) анализа, которые предоставляет карта [8]. В настоящее время концепции и методы ГИС совместно с использованием фундаментальных принципов в области бизнес-аналитики трансформируются в более широкий класс программного обеспечения — Location Intelligence (LI). LI позволяет комплексно анализировать пространственные данные и получать ключевую аналитическую информацию, принимать лучшие оперативные, тактические и стратегические решения, а также оптимизировать важные процессы и прикладные технологии [9, 10]. Применительно к эпидемиологии LI предоставляет экспертам инструмент для отображения динамики распространения инфекционных заболеваний, позволяет проводить оценку и интеграцию различных данных (как географических, так и эпидемиологических), на основе которых проводится эпидемиологический анализ и, в случае интеграции математической модели, — оперативный прогноз эпидемиологической ситуации с визуализацией результатов на карте [11].

Математическое моделирование достаточно давно получило признание как важный инструмент в эпидемиологии [12–14]. Модели позволяют определить численные закономерности эпидемического процесса, просчитывать возможные сценарии развития эпидемий и определять их исходы, сравнивать эффективность различных стратегий профилактических и противоэпидемических мероприятий. Выбор подхода к моделированию зависит от изучаемого инфекционного заболевания, а также от определённых задач, стоящих перед исследователем [15].

Наиболее детальными и перспективными являются агентные модели [16, 17]. Они состоят из популяции агентов, окружения и набора правил, регулирующих поведение агента, что «приближает» модель к реальной ситуации [17]. Агент-ориентированные модели могут использоваться для моделирования нелинейных отношений между агентами, с более детальным проектированием межличностных взаимодействий, и тем самым решать более широкий спектр исследовательских задач, чем при использовании традиционных аналитических подходов. При агентном моделировании поведение на микроуровне влияет на динамику поведения на макроуровне, т.е. моделирование проводится «снизу вверх» [18]. Даже простые агентные модели способны демонстрировать сложные взаимодействия поведения агентов и предоставлять ценную информацию о динамике реальной системы [19].

Цель работы: демонстрация возможностей программных инструментов, основанных на мультиагентном моделировании и реализованных в ГИС нового поколения, для решения эпидемиологиче-

ских задач (на примере распространения кори в мегаполисе).

Материалы и методы

Материалом для проведения исследований послужили данные, собранные на основании анонимизированных актов и отчётов по санитарно-эпидемиологическому расследованию случаев заболевания корью за 2013–2015 гг. в Москве. Период наблюдения для анализа выбран в связи с изменением эпидемиологической ситуации по кори, когда на фоне низкого уровня заболеваемости в 2008–2010 гг. в условиях значительного охвата населения вакцинацией в декретированных возрастных группах детей (95%) и взрослых (90%) в Москве наблюдался рост заболеваемости и в 2013–2015 гг. было зарегистрировано несколько крупных вспышек кори.

Информационный массив включал сведения о больном (пол, возраст, адрес проживания, состав семьи, место работы), данные о болезни (первый день сыпи, дата заболевания, дата обращения к врачу, дата госпитализации), также сведения о прививках против кори (плановая вакцинация, ревакцинация) и описание противоэпидемических мероприятий, предпринятых в отношении контактных лиц (членов семьи, жителей дома/подъезда).

Для исследований использована отечественная геоинформационная (облачная) система с русифицированным интерфейсом «Геоинтеллект» (далее Геоплатформа) и настраиваемыми отчётами, позволяющая визуализировать на интерактивной карте аккумулированные данные. Геоплатформа хранит информацию в виде набора тематических слоёв. Обозначение «слой» применяется для организации векторных данных и представляет собой позиционные данные — плоские координаты, описывающие положение и взаимное размещение геометрически однотипных по размерности предметов территории, относящихся к одному тематическому классу. Все доступные исходные слои в платформе сгруппированы по смыслу и не включают персонифицированные данные, а содержат агрегированные метрики, показывающие места массового скопления людей¹.

Имеющиеся в системе слои были дополнены новым тематическим разделом «Слой Гамалеи». Он содержит информационный массив об инфекционной заболеваемости, который был сгруппирован для удобства визуализации по кварталам года, а также представлен по муниципальным районам (на 100 тыс. населения) и по административным округам (на 100 тыс. населения). В «Слой Гамалеи» также включены данные о заболеваемости корью, распределённые по первому дню сыпи. Для про-

¹ Федеральный закон от 27.07.2006 № 152 «О персональных данных».

| id [PK] integer | id_virus smallint | status_name_ru character varying (255) | status_name_en character varying (255) | min_day character varying (255) | max_day character varying (255) | active smallint | infective smallint | position smallint |
|--------------------|----------------------|---|---|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| 1 | 1 | период инкубации незаразен активный | incub_not_contagious_active | 10 | 14 | 1 | 0 | 1 |
| 2 | 2 | период инкубации заразен активный | incub_contagious_active | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| 3 | 3 | продромальный период заразен актив... | premonitory_contagious_ac... | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 4 | 4 | продромальный период заразен неакт... | premonitory_contagious_no... | 2 | 3 | 0 | 1 | 4 |
| 5 | 5 | период сыпи заразен неактивный | rash_contagious_not_active | 3 | 4 | 0 | 1 | 5 |
| 6 | 6 | период выздоровления незаразный н... | recovery_not_contagious_n... | 7 | 10 | 0 | 0 | 6 |
| 7 | 7 | здоровый | healthy | 1000 | 1000 | 1 | 0 | 7 |

Рис. 1. Определение временных интервалов для стадий-состояний инфекционного процесса кори в модели инфекционного процесса.

Fig. 1. Determination of time intervals for stages-states of the infectious process of measles in the model of the infectious process.

ведения временного анализа заболеваемости был разработан функционал «Timeline», позволяющий «прокручивать» визуализируемые на карте данные вперед и назад (с шагом 1 день). С помощью настройки фильтра можно выбирать необходимые поля для дальнейшего анализа (например, выбор территории с высокими/низкими показателями заболеваемости, визуализация больных в пределах конкретной территории, определение периода времени для анализа).

Также в тематический раздел «Слои Гамалеи» были внесены сопроводительные сведения о проведенном эпидемиологическом расследовании в очаге по каждому конкретному случаю (источник инфекции, течение болезни, иммунный статус, мероприятия в очаге и т.д.), которые были разнесены по полям в соответствии с хранимой информацией. Включение различных тематических слоев и функционала совместно с разделом «Слои Гамалеи» предоставляет широкие возможности для визуализации и анализа данных.

При моделировании распространения кори в Москве был применен агентный подход. Модель содержит 10 645 702 агентов, которые были распределены с помощью специального алгоритма и объединены в домохозяйства на основе данных Росстата о составе семей и распределении по квартирам.

Разработанная модель распространения кори была представлена в виде 3 независимых вложенных моделей (подмоделей): модель поведения популяции, модель инфекционного процесса и модель инфицирования. Для разработки модели были использованы данные об особенностях клиники и эпидемиологии кори².

² WHO. Fact sheets / Details / Measles. URL: <http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/measles> (дата обращения 11.02.2021); МУ 3.1.2943-11 «Организация и проведение серологического мониторинга состояния коллективного иммунитета к инфекциям, управляемым средствами специфической профилактики (дифтерия, столбняк, коклюш, корь, краснуха, эпидемический паротит, полиомиелит, гепатит В)», 2011. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088401> (дата обращения 11.02.2021); МУ 3.1.3114/1-13 «Организация работы в очагах инфекционных и паразитарных болезней», 2014. URL: https://www.rosпотребнадзор.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=4872 (дата обращения 11.02.2021).

Модель поведения популяции описывает среду пребывания агентов, смену мест их нахождения по определенному расписанию (распорядку). Для моделирования (симуляции) поведения популяции каждому агенту определялось место работы (место дошкольных учреждений, школ, колледжей и университетов) с учетом транспортной сети, движения транспортных средств и перемещения агентов по определенному расписанию в соответствии с исследованиями «Яндекс». Таким образом, моделировалась ситуация, приближенная к реальной.

Модель инфекционного процесса описывает развитие инфекционного процесса в каждом агенте и его поведение в зависимости от пребывания в определенной стадии болезни. Основываясь на данных литературы³ [20], в модели инфекционного процесса были определены временные интервалы для стадий-состояний инфекционного процесса кори, а также «статус» агента в зависимости от степени заразности стадии инфекции и состояния активности агента (**рис. 1**). «Статус» агента определяет его вероятность быть источником инфекции.

Модель инфицирования описывает частоту контактов агентов, находящихся одновременно в одном и том же месте, а также вероятность инфицирования вирусом кори с учетом дистанции от больного агента.

Модульность и независимость подмоделей позволяют использовать необходимые статистические и клинические данные — как относящиеся непосредственно к изучаемому заболеванию, так и демографические показатели, которые анализируются и хранятся в тематических слоях Геоплатформы. С помощью реализованной в модели матрицы локаций, которая отражает информацию о нахождении агента в любой промежуток времени, из списка

³ Руководство ВОЗ по лабораторной диагностике кори и краснухи. Вторая редакция. URL: https://www.who.int/ihr/elibrary/manual_diagn_lab_mea_rub_ru.pdf (дата обращения 12.02.2021); МР № 74 «Корь: эпидемиологические особенности в период элиминации, современные возможности профилактики, диагностики и лечения. Значение серологического исследования популяционного иммунитета населения». М.; 2020.

окружающих лиц, исходя из плотности агентов и расстояния от инфицированного агента в локации, с помощью модели инфицирования происходит симуляция заражения.

В качестве входных параметров для модели поведения популяции были использованы данные тематических слоев Геоплатформы о местах проживания агентов в домохозяйствах, их структуре и половозрастном составе, о местах приложения труда с экспертной оценкой числа работающих, о школах и детских садах с экспертной оценкой числа учащихся, о прочих местах скопления людей (метро, торговые центры, торгово-развлекательные комплексы, религиозные учреждения, вокзалы, рынки и др.). Также предусмотрено добавление транспортного потока людей. В текущей версии модели действуют:

- маршрутные листы линий метро с географической привязкой к остановкам;
- маршрутные листы линий общественного транспорта (маршрутки, автобусы, троллейбусы) с географической привязкой к остановкам;
- статистика о периоде и скорости перемещения транспорта.

На основе этих данных проводится симуляция рейсов транспорта и передвижения агентов в соответствии с данными расчёта оптимального маршрута для каждого агента.

Для демонстрации возможностей разработанного программного приложения были составлены пилотные варианты задач по двум направлениям:

- задачи первого направления, или *ситуационные задачи*, ориентированы на ретроспективный анализ эпидемиологической ситуации и выявление определяющих её факторов;
- задачи второго направления, или *симуляционные задачи*, ориентированы на анализ текущей эпидемиологической ситуации, которая была смоделирована с помощью агентной модели, с возможностью проведения оперативного прогноза с учётом противоэпидемиологических мероприятий.

В задачах описаны многочисленные эпидемиологические ситуации с визуализацией на электронных картах и предложены инструменты для их решения. Условные обозначения расшифрованы в Легенде.

Результаты

Использование тематических данных (слоев) и функционала платформы для решения эпидемиологических задач

При разработке ситуационных задач за основу были взяты предварительно обработанные акты и отчёты по санитарно-эпидемиологическому рас-

Легенда инструмента (модели) распространения заболевания

- Все агенты, участвующие в конкретном расчёте распространения заболевания;
- агент, который заболевает, но ещё не заразен;
- агент болеет, появились симптомы, заразен;
- агент выздоровел, не заразен;
- 🏠 место проживания агента;
- 🏪 место посещения агента, магазин;
- 🎓 место посещения агента, учебное заведение;
- 🕌 место посещения агента, религиозное заведение;
- 👤 место посещения агента, место работы;
- оранжевая сплошная линия — от дома к работе;
- тонкая оранжевая линия — заражение агентов вторичного очага с локализацией на работе;
- фиолетовая сплошная линия — от дома к религиозному месту;
- тонкая фиолетовая линия — заражение агентов вторичного очага с локализацией в религиозном учреждении;
- синяя сплошная линия — от дома к торговому центру;
- тонкая синяя линия — заражение агентов вторичного очага с локализацией в торговом центре;
- красная сплошная линия — от дома к учебному заведению;
- тонкая красная линия — заражение агентов вторичного очага с локализацией в учебном заведении;
- чёрная линия под цветной сплошной линией — место, где заразился выделенный человек;
- тонкая чёрная линия — «от кого и где заразился выделенный агент по указанному адресу».

следованию случаев заболевания корью в Москве в 2013–2015 гг., которые были объединены и преобразованы в электронную базу данных [21].

Условия ситуационных задач включают данные больного (год рождения, пол, адрес проживания), данные о дате посещения врача, анамнезе заболевания, наличии вакцинации против кори (больного и совместно проживающих), данные о контактных лицах, дату подтверждения диагноза (корь), дату госпитализации, сведения о составе семьи. Решение ситуационных задач ориентировано на использование тематических слоёв и функционала

Геоплатформы, в том числе активное использование раздела «Слои Гамалеи».

Из условий задачи определяется адрес и осуществляется поиск конкретного дома на карте, где проживает больной корью. Затем, ориентируясь по дате заболевания из условия задачи, в меню «Слои Гамалеи» выбирается слой с данными о заболевших корью по первому дню сыпи, с использованием функционала «Фильтр слоя», например, для выбора заболевших во II квартале 2014 г. (рис. 2). В открывшемся окне содержится информация о количестве подтверждённых случаев кори по искомому адресу, о территориальных границах очага, а также информация по каждому выявленному больному, проживающему в подъезде или в доме.

Условие задачи может содержать сведения о заражении корью детей, например, в дошкольном учреждении. Для подтверждения требуется провести эпидемиологическое расследование и определить количество детей с признаками заболевания корью в пешей доступности 10 мин от конкретного детского сада. Выбираются «Объекты детской тематики» — на карте появляются значки «Дошкольные учреждения (детские сады, ясли)», затем при помощи функционала «Информация в зоне пешей доступности 2.0» высвечиваются на карте дома с выявленными больными. Определяют количество больных и в открывающемся информационном окне дополнительно изучают сопроводительную информацию по каждому адресу.

«Слои Гамалеи» также содержат относительные показатели заболеваемости (на 100 тыс. населения) по соответствующим годам в разрезе административных округов, муниципальных районов Москвы, градуированные с помощью цвета в зависимости от уровня заболеваемости. Для примера на рис. 3 представлено распределение заболеваемости корью (на 100 тыс. населения) по муниципальным округам г. Москвы во II квартале 2014 г.

Включение дополнительного инструмента «Timeline» позволяет определить количество лиц, заболевших корью в определённом муниципальном районе, например в районе Бирюлево и Восточное Бирюлево, на 38-й день после появления сыпи у первого инфицированного агента, описанного в условии задачи, которое составило 33 больных (рис. 3).

Геоплатформа позволяет осуществлять визуализацию и проводить как пространственный, так и временной анализ заболеваемости на уровне отдельных муниципальных или административных районов города, а также одновременно нескольких административных округов или в масштабе всего города.

На рис. 4 представлен фрагмент визуализации с помощью инструмента «Timeline» количества больных на территории всего города (на 11-й день выявлены 9 больных).

Таким образом, решение ситуационных задач (первого направления) ориентировано на активное

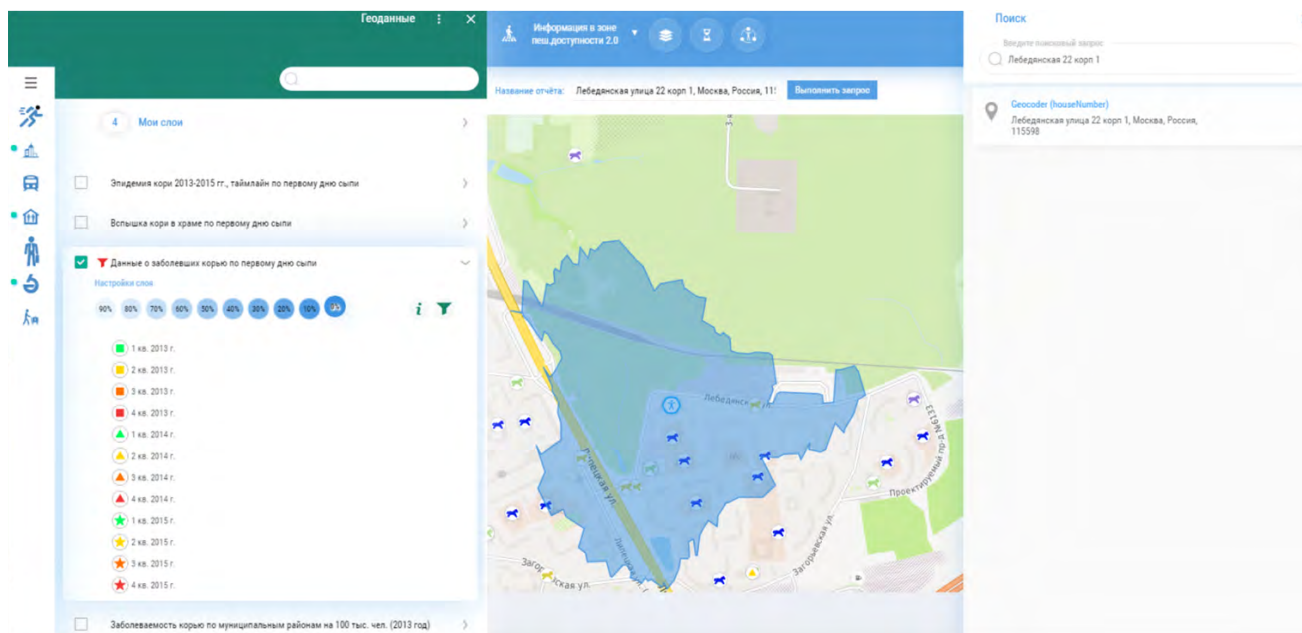


Рис. 2. Поиск конкретного дома на карте, включение необходимых слоёв платформы. Выбор и использование в меню функционала «Информация в зоне пешей доступности 2.0».



 — дошкольные учреждения (детские сады, ясли).

Fig. 2. Search for a specific house on the map, including the required platform layers. Selection and use in the menu of the “Information in the foot zone availability 2.0” tool.

 — preschool institutions (kindergartens, nurseries).

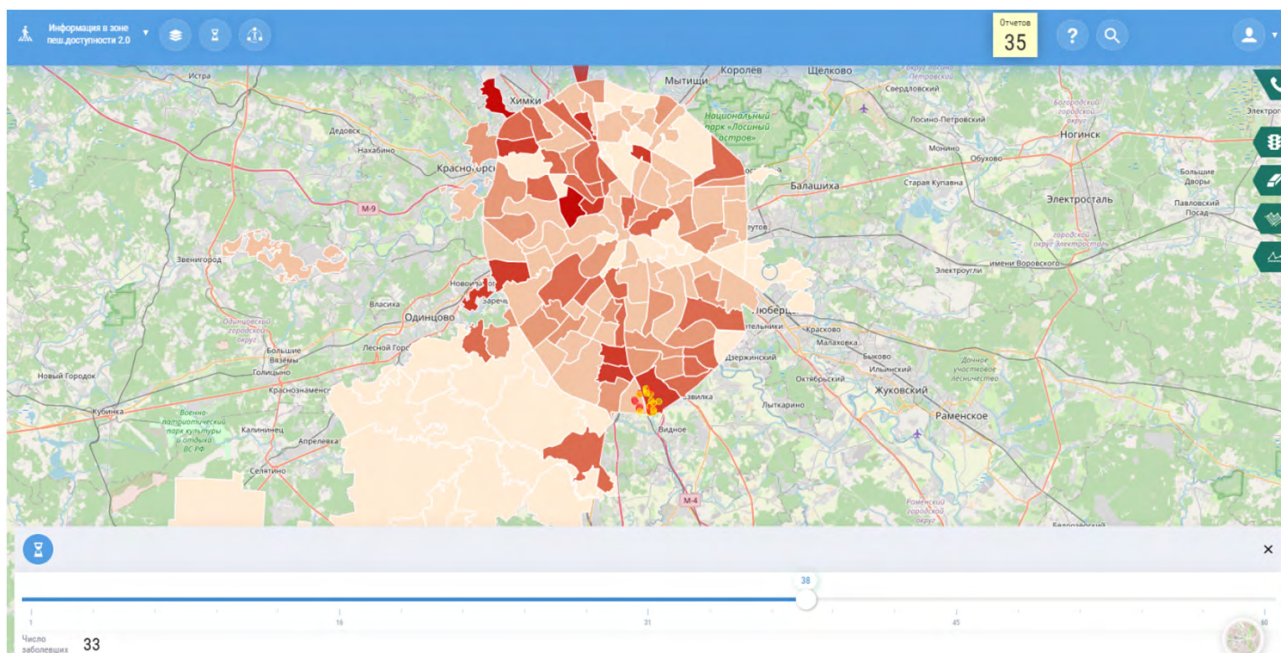


Рис. 3. Выбор и использование слоя «Заболеваемость корью по муниципальным районам на 100 тыс. населения в 2014 г.» и инструмента «Timeline».

Fig. 3. Selection and use of the layer “Measles incidence by municipalities per 100 thousand population in 2014” and the “Timeline” tool.

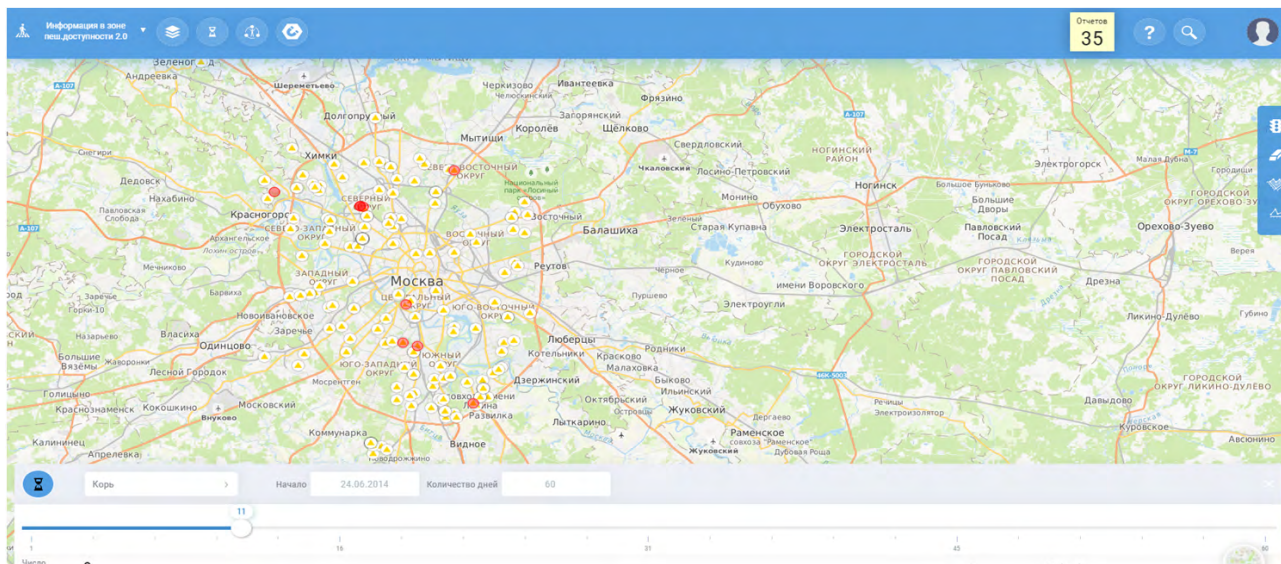


Рис. 4. Визуализация количества случаев в Москве (на 11-й день).

Fig. 4. Visualization of the number of cases in Moscow (on day 11).

использование геоинформационной платформы, которая предоставляет функциональные и визуальные возможности для проведения комплексного анализа эпидемиологической ситуации — на уровне конкретного дома, муниципального района, административного района и территории всего города. Разработанные инструменты могут быть использованы как актуальное дополнение для оценки квалификационной характеристики специалиста врача-эпидемиолога.

Использование интегрированной в геоплатформу агентной модели для решения эпидемиологических задач

Задачи второго направления ориентированы на использование агентной модели, с помощью которой проводится компьютерная симуляция развития эпидемии (вспышки) кори.

В ходе проведения симуляции специалист исследует варианты развития эпидемического процесса распространения кори, анализирует и оцени-

вает влияние различных сценариев мер противодействия.

При агентном моделировании проектирование производится с максимальным приближением к реальным процессам в человеческой популяции. В рамках агентного подхода вводится понятие «агент», которое характеризует поведение одного человека, принадлежащего к определённой возрастной группе.

В модели имитируется жизнь населения согласно заданному алгоритму, определяются контакты инфицированных лиц, места посещения и одновременного пребывания. В модели реализована матрица локаций, представляющая все возможные варианты перемещения агента в течение суток. Она содержит информацию о том, в каком месте находится человек в любой промежуток времени. Далее из списка окружающих лиц, исходя из плотности агентов в локации, происходит симуляция заражения контактных агентов. Согласно алгоритму вокруг инфицированного агента создаются буферные зоны. Количество буферных зон и их наполняемость зависят от плотности агентов в данной локации. В результате формируется список восприимчивых агентов, с которыми был контакт. Вероятность заражения определяется набором правил для агента, принадлежащего к определённой возрастной группе, а также дистанцией каждого агента от инфицированного.

Процесс продолжается до последнего дня симуляции. Список инфицированных лиц пополняется каждый день. Для каждого нового инфицированного агента программа на основе стадий-состояний протекания инфекционного процесса кори рассчитывает индивидуальное течение болезни и добавляет его в список больных агентов, одновременно определяется список его контактов. Таким способом симулируется процесс распространения кори на изучаемой территории.

В качестве начальных настраиваемых параметров при моделировании выступают следующие характеристики:

- место проживания первого больного агента, выбирается конкретный адрес на карте города;
- доля вакцинированного населения (рассчитывается на основании охвата при плановой вакцинации), может настраиваться в зависимости от увеличения или уменьшения охвата;
- введение мер противодействия (экстренная вакцинация, изоляция).

В качестве настраиваемых, но зашитых для пользователя параметров предложены стадии-состояния заболевания с длительностью протекания, плотность агентов в матрице локаций и вероятность инфицирования.

Пользователь выбирает количество и список первых больных (максимально до 5 человек) по конкретному адресу или нескольким адресам, задаёт начальные условия «доля восприимчивых лиц» и устанавливает количество дней для симуляционного расчёта. Интеграция агентной модели в Геоплатформу позволяет визуализировать «цепочки» заражения с отображением на карте мест посещения инфицированного агента (источника инфекции) и лиц, контактировавших с ним.

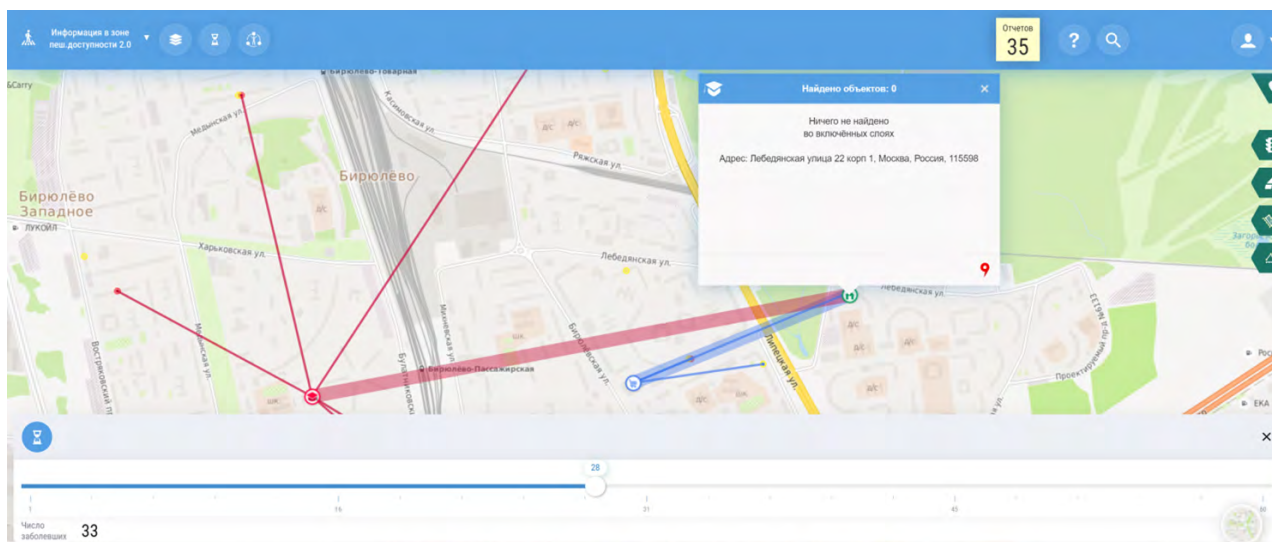


Рис. 5. Демонстрация локаций первичного очага (первый агент в доме по адресу: ул. Лебедянская д. 22, корп. 1) и выявления контактных лиц вторичного очага (от учебного заведения — тонкие красные линии, от торгового центра — синие).

Fig. 5. Demonstration of the locations of the primary focus of infection (the first agent in the house at 22 Lebedyanskaya street, building 1) and identification of the contact persons of the secondary foci (from the educational institution — thin red lines, from the shopping center — blue).

На **рис. 5** представлен пример выявления источников распространения кори через различные локации инфицированных агентов. Отображаются места и контактные лица, которые заразились от первого агента. Синяя сплошная линия ведёт от дома (первичного очага) в магазин, красная сплошная — от дома в учебное заведение, оранжевая сплошная — от дома на работу. Тонкие линии ведут к местам проживания заражённых агентов. Таким образом, эпидемиолог визуализирует процесс «заражения» (распространения вируса) восприимчивых контактных лиц, что позволяет в рамках моделирования наглядно изучать закономерности эпидемического процесса.

На **рис. 6** представлены взаимосвязи между агентами, находящимися в разных локациях (дом, учебное заведение, магазин). Сплошная красная линия с тонкой чёрной линией показывает, что агент, проживающий по адресу Востряковский проезд 3, корпус 1, имел контакт в учебном заведении с инфицированным человеком, который проживает (тонкая черная линия) по адресу ул. Лебедянская д. 22, корп. 1 (в первичном очаге). Существует возможность визуализировать также контактных лиц, которые инфицированы, но ещё не заразны (отмечены жёлтым цветом).

В практической работе эпидемиолога каждый случай кори подлежит расследованию, при котором устанавливаются прививочный и инфекционный анамнез заболевшего и контактных лиц. По результатам такой работы эпидемиологом определяются контингенты для проведения экстренной вакцинации или введения противокорревого иммуноглобулина.

В модели распространения кори была также заложена возможность оценки вклада различных

противоэпидемических мероприятий, предпринятых в отношении восприимчивых лиц (плановая вакцинация), больных с симптомами (изоляция) и в отношении контактных лиц (экстренная вакцинация, введение противокорревого иммуноглобулина).

Изоляция больных в модели реализуется путем исключения из математических расчётов агента с момента появления и выявления первых симптомов болезни (изоляция дома или госпитализация).

При моделировании мер в отношении контактных лиц были приняты следующие допущения:

- вакцинация проводится лицам в возрасте от 1 года до 64 лет включительно, вакцина эффективна в первые 2 сут после контакта, эффективность защиты 85%;
- для детей в возрасте 0 до 1 года и лицам старше 65 лет вводится иммуноглобулин не позднее 5 дней после контакта, эффективность защиты иммуноглобулином принята за 100%.

С помощью функционала «Экстренная вакцинация» задаются день начала вакцинации и процент охвата вакцинацией контактных лиц. При этом предполагается, что экстренную вакцинацию можно провести не ранее чем через 14 дней с момента инфицирования первого агента (появление симптомов заболевания). Для оценки вклада экстренной вакцинации в снижение заболеваемости необходимо сравнить количество больных по сценариям с и без охвата вакцинацией.

С помощью инструмента «Timeline» определяется количество больных корью лиц по сценарию без экстренной вакцинации — в нашем симуляционном примере на 60-й день количество больных составило 33 человека (**рис. 7**). После

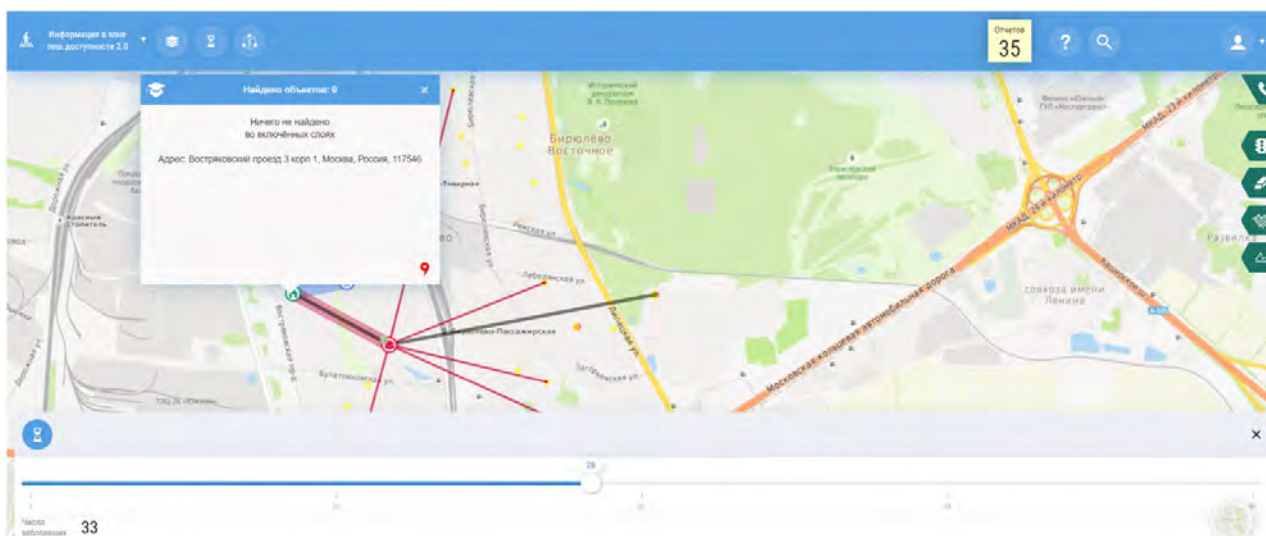


Рис. 6. Демонстрация и анализ контактов первичного (дом, ул. Лебедянская 22) и вторичного (учебное заведение) очагов заражения.

Fig. 6. Demonstration and analysis of contacts of primary (house, 22 Lebedyanskaya Street) and secondary foci of infection (educational institution).

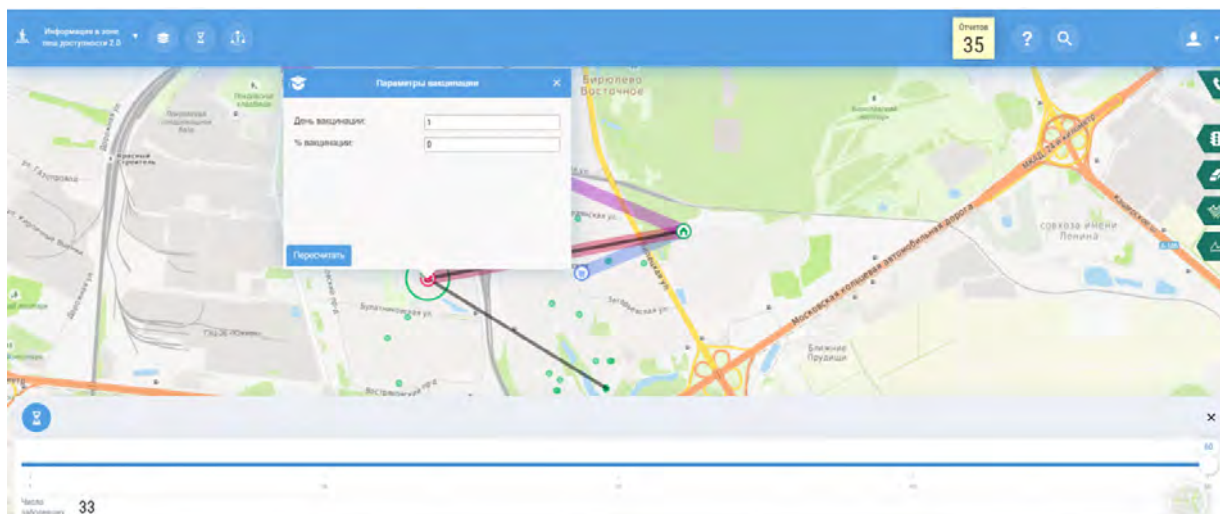


Рис. 7. Количество больных лиц на 60-й день (сценарий без экстренной вакцинации).

Fig. 7. The number of cases on the 60th day (scenario without emergency vaccination).

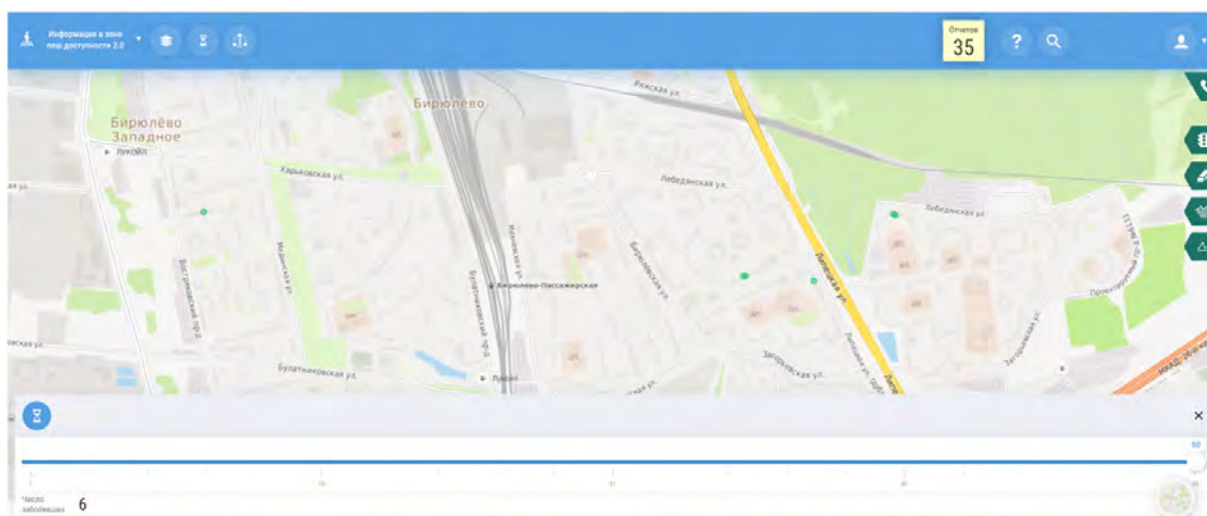


Рис. 8. Количество больных лиц (6 человек) на 60-й день (сценарий с экстренной вакцинацией).

Fig. 8. The number of cases (6 persons) on the 60th day (scenario with emergency vaccination).

внесения данных об охвате экстренной вакцинацией контактных лиц (по адресу первого выявленного инфицированного агента) производится пересчёт модели. На **рис. 8** представлен результат расчёта (по сценарию с экстренной вакцинацией) количества больных корью — на 60-й день выявлено 6 человек. Таким образом, в приведённом примере экстренная вакцинация контактных лиц после выявления первого больного позволила предотвратить 27 случаев заболевания за наблюдаемый период (60 дней).

Используя слои, функционал Геоплатформы и дополнительно внедрённые в неё модули, пользователь может открыть заранее подготовленные расчёты или выполнить симуляцию в онлайн-режиме, внести название нового расчёта и настроить начальные условия (выбрать дату расчёта, результаты будут различаться по начальной дате, выпавшей

на будние или выходные дни, настроить количество дней симуляции, определить долю восприимчивых лиц, выбрать первого/первых инфицированных лиц по конкретному адресу/адресам). Список лиц, проживающих в доме по конкретному адресу, разделен по семьям и содержит данные (симулированные программой) о возрасте и сфере занятости агентов. После завершения симуляции можно визуализировать результат расчёта (оперативный прогноз на несколько недель вперед) динамики заболеваемости корью.

В конце симуляции формируется итоговый результат в виде отчёта, в котором содержится список всех инфицированных, с историей болезни каждого агента. В историю болезни входят все стадии-состояния протекания инфекционного процесса кори, что позволяет проследить динамику инфекционного процесса у конкретного агента: идентифициро-

вать, на какой день появились симптомы, сколько длился инкубационный период и когда выздоровел. Результаты сохраняются в базе данных с возможностью их визуализации на карте.

Таким образом, использование агентной модели совместно с Геоплатформой позволяет моделировать и визуализировать на карте распространение инфекционных заболеваний с учётом проведения общепринятых противоэпидемических мер в отношении инфицированных и контактных лиц (изоляция, экстренная вакцинация).

В перспективе дальнейшей разработки существует возможность расчёта с помощью модели вклада конкретных административных воздействий на динамику заболеваемости, например учёт в отдельности: ограничения работы транспорта или торговых и развлекательных объектов, промышленных предприятий, закрытия школьных и дошкольных учреждений и др., а также оценить необходимую продолжительность таких мер. Возможности разработанного инструмента позволяют проводить анализ и оценку отдельных мер противодействия эпидемии на уровне города, субъекта федерации, страны в целом.

Заключение

Сотрудниками НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи и компании «Геоинтеллект» разработаны программные инструменты, которые в перспективе могут быть полезным и актуальным дополнением в повседневной работе специалистов, способствовать совершенствованию и углублению практических навыков и умений в соответствии с видами и задачами профессиональной деятельности.

В статье мы ограничились описанием лишь небольшой части возможностей платформы и разработанной агентной модели распространения в мегаполисе инфекции с воздушно-капельным механизмом передачи (на примере распространения кори). В перечень задач первого и второго направления включены эпидемиологические ситуации, решаемые врачом-эпидемиологом в практической работе, и предложены инструменты для их решения. С помощью интегрированной в платформу модели расширяются возможности для анализа и прогноза распространения заболеваний (в том числе COVID-19), поиска оптимальных противоэпидемических мероприятий в городе, а также формирования отчётов для помощи в принятии управленческих решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Акимкин В.Г. Резолюция Всероссийской научно-практической интернет-конференции с международным участием «Молекулярная диагностика и биобезопасность — 2020» (Москва, 6–8 октября 2020 г.). *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2020; 97(6): 610–12.
- Симонова Е.Г. *Профессиональная подготовка специалистов в системе управления эпидемическим процессом*. М.: Спутник+; 2010.
- Heesterbeek H., Anderson R., Andreasen V., Bansal S., De Angelis D., Dye C., et al. Modeling infectious disease dynamics in the complex landscape of global health. *Science*. 2015; 347(6227): aaa4339. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4339>
- Thompson K.M. Evolution and use of dynamic transmission models for measles and rubella risk and policy analysis. *Risk Anal*. 2016; 36(7): 1383–1403. <http://doi.org/10.1111/risa.12637>
- Беляков В.Д., Яфаев Р.Х. *Эпидемиология*. М.: Медицина; 1989.
- Clarke K.C., McLafferty S.L., Tempalski B.J. On epidemiology and geographic information systems: a review and discussion of future directions. *Emerg. Infect. Dis*. 1996; 2(2): 85–92. <https://doi.org/10.3201/eid0202.960202>
- Асатрян М.Н., Салман Э.Р., Семененко Т.А. Анализ закономерностей и прогнозирование процессов распространения гепатита В на территориях федеральных округов РФ. В кн.: *Сборник трудов конференции «Геоинформационные системы в здравоохранении РФ: данные, аналитика, решения»*. СПб.; 2016: 75–82.
- Струков Д.Р., Чигинева А.С. Пространственный метод анализа доступности медицинской помощи на примере Санкт-Петербурга. *Геоматика*. 2014; (3): 51–5.
- Location Intelligence — Аналитика, основанная на местоположении. Available at: <http://sergeytkhomirov.ru/location-intelligence-analitika-osnovannaya-na-mestopolo/>
- Герхардт Э. Информационные системы и базы данных. *Вестник НГУЭУ*. 2015; (4): 309–16. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/c00/c00c48e637002713d59b000d2eb37c6.pdf>
- Салман Э.Р., Асатрян М.Н., Семененко Т.А. Анализ и прогноз развития водных вспышек гепатита А техногенного характера на территории Российской Федерации. В кн.: *Сборник трудов конференции «Геоинформационные системы в здравоохранении РФ: данные, аналитика, решения»*. СПб.; 2016: 65–8.
- Боев Б.В. Модель развития эпидемии гриппа А(H1N1) в России в сезон 2009–2010 годов. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2010; (1): 52–8.
- Боев Б.В. *Прогнозно-аналитические модели эпидемий (оценка последствий техногенных аварий и природных катастроф)*. М.; 2005. Available at: <https://www.armscontrol.ru/course/lectures05a/bvb050324.pdf>
- Burke D.S. Appendix E. Computational modeling and simulation of epidemic infectious diseases. In: Lederberg J., ed. *Microbial Threats to Health: Emergence, Detection, and Response*. Washington; 2003. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK221490>
- Салман Э.Р., Коренберг Э.И., Асатрян М.Н. Моделирование эпизоотического процесса облигатнотрансмиссивных инфекций, передающихся иксодовыми клещами. *Успехи современной биологии*. 2018; 138(6): 583–601. <https://doi.org/10.7868/S004213241806006>
- Das T.K., Savachkin A.A., Zhu Y. A large-scale simulation model of pandemic influenza outbreaks for development of dynamic mitigation strategies. *IIE Transactions*. 2008; 40(9): 893–905. <https://doi.org/10.1080/07408170802165856>
- DeAngelis D.L., Diaz S.G. Decision-making in agent-based modeling: a current review and future prospectus. Review article. *Front. Ecol. Evol*. 2019; 6: 237. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00237>
- Tracy M., Cerdá M., Keyes K.M. Agent-based modeling in public health: current applications and future directions. *Annu. Rev. Public Health*. 2018; 39: 77–94. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth040617-014317>

19. Huntera E., Mac Nameeb B., Kellehera J.D. A taxonomy for agent-based models in human infectious disease epidemiology. *J. Artif. Soc. Soc. Simul.* 2017; 20(3): 2. <https://doi.org/10.18564/jasss.3414>
20. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Аleshкин В.А. *Корь в России: проблемы ликвидации*. М.: Династия; 2017.
21. Ноздрачева А.В., Семенов Т.А., Асатрян М.Н., Шмыр И.С., Ершов И.Ф., Соловьев Д.В. и др. Иммунологическая восприимчивость населения мегаполиса к кори на этапе ее элиминации. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2019; 18(2): 18–26. <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2019-18-2-18-26>

REFERENCES

1. Akimkin V.G. Resolution of the all-Russian scientific and practical internet conference with international participation «Modern immunization: challenges, opportunities, prospects» (Moscow, October 19–20, 2020). *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii*. 2020; 97(6): 610–12. (in Russian)
2. Simonova E.G. *Professional Training of Specialists in the Epidemic Process Management System [Professional'naya podgotovka spetsialistov v sisteme upravleniya epidemicheskim protsessom]*. Moscow: Sputnik+; 2010. (in Russian)
3. Heesterbeek H., Anderson R., Andreasen V., Bansal S., De Angelis D., Dye C., et al. Modeling infectious disease dynamics in the complex landscape of global health. *Science*. 2015; 347(6227): aaa4339. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4339>
4. Thompson K.M. Evolution and use of dynamic transmission models for measles and rubella risk and policy analysis. *Risk Anal.* 2016; 36(7): 1383–1403. <http://doi.org/10.1111/risa.12637>
5. Belyakov V.D., Yafaev R.Kh. *Epidemiology [Epidemiologiya]*. Moscow: Meditsina; 1989. (in Russian)
6. Clarke K.C., McLafferty S.L., Tempalski B.J. On epidemiology and geographic information systems: a review and discussion of future directions. *Emerg. Infect. Dis.* 1996; 2(2): 85–92. <https://doi.org/10.3201/eid0202.960202>
7. Asatryan M.N., Salman E.R., Semenenko T.A. Analysis of patterns and forecasting of the spread of hepatitis B in the territories of the federal districts of the Russian Federation. In: *Proceedings of the Conference «Geoinformation Systems in Healthcare of the Russian Federation: Data, Analytics, Solutions» [Sbornik trudov konferentsii «Geoinformatsionnye sistemy v zdravookhraneni RF: dannye, analitika, resheniya»]*. St. Petersburg; 2016: 75–82. (in Russian)
8. Strukov D.R., Chigineva A.S. The spatial method of analysis of the health care access by the example of St. Petersburg. *Geomatika*. 2014; (3): 51–5. (in Russian)
9. Location Intelligence — Location-based analytics. Available at: <http://sergeytkhomirov.ru/location-intelligence-analitika-osnovannaya-na-mestop/> (in Russian)
10. Gerhardt E. Information systems and databases. *Vestnik NGUEU*. 2015; (4): 309–16.
11. Salman E.R., Asatryan M.N., Semenenko T.A. Analysis and forecast of the development of waterborne outbreaks of hepatitis A of a technogenic nature in the territory of the Russian Federation. In: *Proceedings of the Conference «Geoinformation Systems in Healthcare of the Russian Federation: Data, Analytics, Solutions» [Sbornik trudov konferentsii «Geoinformatsionnye sistemy v zdravookhraneni RF: dannye, analitika, resheniya»]*. St. Petersburg; 2016: 65–8. (in Russian)
12. Boev B.V. Modeling of the epidemic of influenza A(H1N1) in Russia season 2009–2010. *Epidemiologiya i vaksino profilaktika*. 2010; (1): 52–8. (in Russian)
13. Boev B.V. *Predictive and Analytical Models of Epidemics (Assessment of the Consequences of Man-Made Accidents and Natural Disasters) [Prognozno-analiticheskie modeli epidemiy (otsenka posledstviy tekhnogennykh avariyy i prirodnykh katastrof)]*. Lecture. Moscow; 2005. Available at: <https://www.arm-scontrol.ru/course/lectures05a/bvb050324.pdf> (in Russian)
14. Burke D.S. Appendix E. Computational modeling and simulation of epidemic infectious diseases. In: Lederberg J., ed. *Microbial Threats to Health: Emergence, Detection, and Response*. Washington; 2003. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK221490>
15. Salman E.R., Korenberg E.I., Asatryan M.N. Modeling of epizootic process in obligate vector-borne infections transmitted by ticks. *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2018, 138(6): 583–601. <https://doi.org/10.7868/S004213241806006> (in Russian)
16. Das T.K., Savachkin A.A., Zhu Y. A large-scale simulation model of pandemic influenza outbreaks for development of dynamic mitigation strategies. *IIE Transactions*. 2008; 40(9): 893–905. <https://doi.org/10.1080/07408170802165856>
17. DeAngelis D.L., Diaz S.G. Decision-making in agent-based modeling: a current review and future prospectus. Review article. *Front. Ecol. Evol.* 2019; 6: 237. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00237>
18. Tracy M., Cerdá M., Keyes K.M. Agent-based modeling in public health: current applications and future directions. *Annu. Rev. Public Health*. 2018; 39: 77–94. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth040617-014317>
19. Huntera E., Mac Nameeb B., Kellehera J.D. A taxonomy for agent-based models in human infectious disease epidemiology. *J. Artif. Soc. Soc. Simul.* 2017; 20(3): 2. <https://doi.org/10.18564/jasss.3414>
20. Onishchenko G. G., Popova A. Yu., Aleshkin V.A. *Measles in Russia: Problems of Elimination [Kor' v Rossii: problemy likvidatsii]*. Moscow: Dinastia; 2017.
21. Nozdracheva A.V., Semenenko T.A., Asatryan M.N., Shmyr I.S., Ershov I.F., Solov'ev D.V., et al. Immunological susceptibility of metropolis population to measles in its elimination stage. *Epidemiologiya i Vaksino profilaktika*. 2019; 18(2): 18–26. <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2019-18-2-18-26> (in Russian)

Информация об авторах

Асатрян Марина Норайровна[✉] — к.м.н., с.н.с. отдела эпидемиологии НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия, masatryan@gamaleya.org, <https://orcid.org/0000-0001-6273-8615>

Герасимук Элита Русиндапутри — к.м.н., доц., Государственный Университет «Дубна», Дубна, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7364-163X>

Струкков Денис Раймондович — к.т.н., генеральный директор Центра пространственных исследований, Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-0381-8230>

Шмыр Илья Сергеевич — н.с. отдела эпидемиологии НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-00028514-5174>

Information about the authors

Marina N. Asatryan[✉] — Cand. Sci. (Med.), senior researcher, Department of epidemiology, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia, masatryan@gamaleya.org, <https://orcid.org/0000-0001-6273-8615>

Elita R. Gerasimuk — Cand. Sci. (Med.), Assoc. Prof., Dubna State University, Dubna, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-7364-163X>

Denis R. Strukov — Cand. Sci. (Tech.), General Director, Center for Spatial Researches, St. Petersburg, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-0381-8230>

Ilya S. Shmyr — researcher, Department of epidemiology, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, <https://orcid.org/0000-0002-8514-5174>

Вехов Алексей Олегович — ведущий IT-разработчик Центра пространственных исследований, Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-3253-9812>

Ершов Иван Феликсович — н.с. отдела эпидемиологии НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3333-5347>

Лабодин Андрей Викторович — руководитель IT-департамента Центра пространственных исследований, Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-4122-1833>

Ноздрачева Анна Валерьевна — н.с. отдела эпидемиологии НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия, <https://orcid.org/00000002-8521-1741>

Семеновна Татьяна Анатольевна — д.м.н., проф., акад. РАЕН, рук. отдела эпидемиологии НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6686-9011>

Народицкий Борис Савельевич — д.б.н., проф., зам. директора Института вирусологии им. Д.И. Ивановского НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи по научной работе, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-5522-8238>

Пронин Александр Васильевич — д.б.н., проф., зам. директора НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи по научной работе, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-5266-9783>

Участие авторов. Все авторы внесли существенный вклад в проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию до публикации.

Статья поступила в редакцию 16.02.2021;
принята к публикации 30.05.2021;
опубликована 20.08.2021

Aleksey O. Vekhov — leading IT developer, Center for Spatial Researches, St. Petersburg, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3253-9812>

Ivan F. Ershov — researcher, Department of epidemiology, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, <https://orcid.org/0000-0002-3333-5347>

Andrey V. Labodin — head of IT department, Center for Spatial Researches, St. Petersburg, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-4122-1833>

Anna V. Nozdracheva — researcher, Department of epidemiology, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia, <https://orcid.org/00000002-8521-1741>

Tatiana A. Semenenko — D. Sci. (Med.), professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head, Epidemiology department, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology; professor, Department of infectiology and virology, Sechenov University, Moscow, Russia, <https://orcid.org/00000002-6686-9011>.

Boris S. Naroditsky — D. Sci. (Biol.), professor, Deputy Director for research divisions, D.I. Ivanovsky Institute of Virology, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5522-8238>

Alexander V. Pronin — D. Sci. (Biol.), professor, Deputy Director for research, N.F. Gamaleya Federal Research Centre for Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5266-9783>

Author contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published.

The article was submitted 16.02.2021;
accepted for publication 30.05.2021;
published 20.08.2021