

УДК 517.972+578

Моделирование распространения аэрозольных частиц, содержащих вирус SARS-CoV-2, вокруг госпиталя

Н.А. Лаптева , А.С. Сафатов, А.П. Агафонов*

Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора
630559, Новосибирская обл., р.п. Кольцово

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.;
после доработки 3.04.2023 г.;
принята к печати 13.04.2023 г.

Новая коронавирусная пневмония быстро распространилась по всему миру. Всемирная организация здравоохранения подчеркивала, что коронавирус SARS-CoV-2 передается в основном между людьми, находящимися в тесном контакте друг с другом, а также в случае прикосновения к зараженным поверхностям с последующим касанием глаз, носа или рта без предварительной очистки рук.

Возможными постоянными источниками распространения вируса могут быть большие скопления больных в госпиталях при несоблюдении требований организации функционирования лечебного учреждения. В случае аварийного выброса вирусосодержащего аэрозоля из такого учреждения метеорологические условия могут стать ключевым фактором, влияющим на распространение вируса. Нами была разработана программа математического моделирования возможного распространения патогенных примесей в атмосфере вокруг ковидных госпиталей с учетом различных метеорологических условий. Проведены расчеты, основанные на использовании современных методов решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя атмосферы, которые адаптированы для описания распространения вредных атмосферных примесей над реальным сложным рельефом местности с учетом городской застройки различной этажности, лесных массивов, водоемов, изменяющихся метеорологических условий и множества других факторов.

Программа может быть использована для оценки риска и угрозы распространения вируса при перепрофилировании терапевтического лечебного учреждения в ковидный госпиталь.

Ключевые слова: SARS-CoV-2, распространение вируса в атмосфере, математическое моделирование; SARS-CoV-2, viruses, propagation in the atmosphere, mathematical simulation.

Введение

В настоящее время предполагается, что передача вируса с атмосферным аэрозолем при определенных условиях играет важную роль в его распространении [1–3]. ВОЗ признала, что «нельзя исключить возможность такой передачи вируса» [4–6].

Передача вируса воздушно-капельным путем традиционно определяется как вдыхание инфекционных аэрозолей, или «капельных ядер», размером менее 5 мкм в основном на расстоянии не более 1–2 м от инфицированного человека. Тем не менее существуют убедительные доказательства, подтверждающие передачу по воздуху на большие расстояния многих респираторных вирусов, включая коронавирус тяжелого острого респираторного синдрома (SARS-CoV-2) [7]. Данные лабораторных исследований показали, что вирус SARS-CoV-2 может оставаться активным, находясь в воздухе в течение

длительного времени [8]. Период снижения концентрации коронавируса SARS-CoV-2 в два раза в аэрозоле составляет 2,7 ч [9]. Основные способы передачи респираторных вирусов – прямой, при физическом контакте между людьми, и непрямой, при контакте с загрязненными поверхностями или предметами (фомиты) или по воздуху через загрязненные аэрозоли, которые могут находиться во взвешенном состоянии [10, 11]. Для SARS-CoV-2 в первый год пандемии большое внимание уделялось фомитному пути передачи и проблеме очистки поверхностей. Однако, скорее всего, COVID-19 реже распространяется контактным [12], чем воздушно-капельным путем [13]. Опубликовано много статей, посвященных такой передаче SARS-CoV-2 в плохо вентилируемых помещениях [8, 14, 15], где люди могут проводить длительное время [16]. Исследований, доказывающих, что человек может заразиться вне помещения, нет. Однако есть исследования, основанные на отслеживании контактов с заболевшими, показывающие, что вероятность передачи COVID-19 в закрытом помещении в 18,7 раза выше, чем на открытом воздухе [17, 18].

С учетом того, что вирус SARS-CoV-2 может долгое время (4–5 сут) сохранять жизнеспособность

* Наталья Александровна Лаптева (lapteva@vector.nsc.ru); Александр Сергеевич Сафатов (safatov@vector.nsc.ru); Александр Петрович Агафонов (agafonov@vector.nsc.ru).

в воздухе, предполагается, что аэрозольная передача при определенных условиях играет важную роль в его распространении. В соответствии с этим сценарием ВМО совместно с учеными активно обсуждают взаимосвязь метеорологических факторов окружающей среды с заболеваемостью COVID-19 [19]. После опубликованных результатов исследований, в которых участвовало более 200 ученых [1], ВОЗ изменила отношение к проблеме воздушной передачи коронавируса на открытом воздухе в городах с высокой плотностью населения [20, 21]. Было показано, что в районах с одинаковой численностью населения и похожей застройкой, но находящихся в разных климатических условиях, вирус распространяется разными путями, которые, как предполагается, могут быть связаны с метеорологическими условиями [22].

По распоряжению регионального Министерства здравоохранения РФ для больных COVID-19 был открыт ряд госпиталей в г. Новосибирске в связи со сложившейся на территории региона эпидемической ситуацией. Во всех госпиталях строго соблюдаются требования нормативных документов, принятых на национальном уровне и определяющих безопасное функционирование учреждения. Однако в странах с недостаточным финансированием системы здравоохранения ковидные госпитали могут быть оборудованы не всеми необходимыми инженерно-строительными системами обеспечения биологической безопасности. Также не исключены аварийные выбросы из таких учреждений.

Цель работы — оценка возможных зон загрязнения при случайном выбросе инфекционного аэрозоля из ковидного госпиталя, находящегося на территории города.

Методы исследования

Температура и загрязнение воздуха являются одними из определяющих факторов распространения COVID-19, так же как влажность, скорость ветра, осадки и т.д. [19]. По данным ВОЗ, загрязнение воздуха — один из крупнейших экологических факторов, способствующих заболеваемости и преждевременной смерти в мире. Научные данные [23] показывают, что краткосрочное и долгосрочное воздействия загрязнителей атмосферного воздуха вызывают широкий спектр неблагоприятных последствий для здоровья, включая сопутствующие заболевания. Однако потенциальное воздействие загрязнения воздуха на уровень заболеваемости COVID-19 может проявляться не только в снижении иммунитета у человека, но, возможно, и в прямом переносе вируса SARS-CoV-2 на твердых частицах размером 100–200 нм, попадающих в легкие при дыхании.

Разработанные в ГНЦ ВБ «Вектор» современные математические методы описания рассеяния примесей в атмосфере позволяют достигнуть цели нашей работы. Эти методы основаны на решении полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии, которое широко используется для описания процесса распространения атмосферных примесей [24].

Компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии задаются с помощью экспериментально обоснованной в натуральных условиях гипотезы о пропорциональности их соответствующим компонентам тензора турбулентных напряжений Рейнольдса [25]. Последние определяются с привлечением алгебраической модели типа [26]. Разработана оригинальная численно-аналитическая модель для определения полей скорости ветра, температуры и влажности воздуха [27]. Для расчетов распространения атмосферных примесей с разрешением отдельных зданий и сооружений применяются методы определения полей скорости ветра и температуры, основанные на решении уравнений Навье—Стокса [28]. Модель позволяет вычислять интегральную по времени концентрацию частиц (дозу) в любой точке заданного пространства с помощью функций плотности вероятности концентраций [29].

Для того чтобы определить поля концентрации примесей, необходимо задать входные параметры. Для выбранной площадки задаются рельеф и характеристики подстилающей поверхности (растительный покров, наличие зданий и сооружений, их высота, наличие леса и водоемов). Для определения полей скорости ветра необходимы следующие данные: дата, время суток, метеорологические условия на метеопосте, включающие направление и скорость ветра, температуру, влажность воздуха, балл облачности и др. [29]. Для источника выбросов задаются его координаты, мощность, тип, плотность материала частиц аэрозоля, скорость инактивации, среднемассовый диаметр частиц. С помощью математической программы были смоделированы варианты распространения патогенных примесей в атмосфере вокруг одного из зданий, в котором размещен ковидный госпиталь. Выбраны следующие параметры: время года — зима, весна, лето и осень, время суток — день и ночь, роза ветров — основные восемь направлений, скорость ветра — от минимального значения 2 м/с до максимального 15 м/с. Предполагается, что источник выброса примесей — вентиляционная труба здания госпиталя на высоте 10 м. Район вокруг инфекционной больницы представлен в виде квадрата площадью 16 км². Больница расположена в центре этого квадрата. Выбрана разностная сетка с шагом 50 м по горизонтали и 2 м по вертикали. Для этой площадки учитываются рельеф и подстилающая поверхность с реальной застройкой. Модельные расчеты были проведены с учетом и без учета коэффициента скорости инактивации вируса в составе аэрозольных частиц, который можно рассчитать по формуле [30] в зависимости от температуры, влажности и освещенности. Для данного модельного расчета коэффициент скорости инактивации брался в промежутке от 0,0 до 0,05 с⁻¹.

Результаты и обсуждение

Предварительно проведена оцифровка подстилающей поверхности местности, включающей ковидный госпиталь, прилегающие городские застройки с многоэтажными домами и фрагменты местности

с измененным рельефом. Для моделирования распространения вируса были рассмотрены варианты возникновения дефектов на фильтрах вентиляционной системы ковидного госпиталя. Для расчета возможных траекторий распространения вируса мощность выброса из вентиляционной системы очистки принята за 1 усл. ед. Результаты рассчитаны для слоя воздуха на уровне головы человека, примерно 2 м от земли.

На первом этапе моделирование распространения вируса проведено без учета коэффициента скорости инактивации вируса под действием физических факторов. На рис. 1 (цв. вкладка) представлены примеры распространения пылевых микро-частиц, на которых потенциально может оседать вирус, в виде изолиний концентраций вируса от 10^{-1} до 10^{-7} усл. ед. В обоих примерах видно влияние городской застройки, реки, подстилающей поверхности и рельефа на вероятность появления вирусных частиц в воздухе рядом с ковидным госпиталем.

Второй вариант расчета предусматривает распространение вируса в составе аэрозольных частиц, при котором происходит частичная потеря его активности под действием температуры, влажности, ультрафиолетового излучения и т.д. Моделирование произведено для разных коэффициентов скорости инактивации: от минимального — $0,001 \text{ с}^{-1}$ до максимального для данной местности — $0,05 \text{ с}^{-1}$. На рис. 2 (цв. вкладка) представлены примеры изолиний концентрации вируса, равной 10^{-3} усл. ед. Приоритетным выбрано южное направление ветра. Изолинии рассчитаны для коэффициентов скорости инактивации: 0,000; 0,001; 0,005; 0,010 и 0,050 с^{-1} .

Площадь загрязнения в зимнее время без учета инактивации (высокая облачность, отрицательная температура) при скорости ветра 2 м/с может распространяться на 2 км от ковидного госпиталя, а для коэффициента скорости инактивации 0,050 — на 500 м. Летом площадь загрязнения увеличивается в ширину по сравнению с зимой.

Ожидаемо сильно влияет на распространение вируса скорость ветра. В связи с этим было проведено сравнение зависимости области распространения вируса от скорости ветра для всех четырех времен года. На рис. 3 (цв. вкладка) представлены изолинии концентрации вируса при минимальной и максимальной скоростях ветра для января в дневное время. Площадь загрязнения при скорости ветра 2 м/с при концентрации вируса, например, 10^{-3} усл. ед. составляет в длину до 600 м от ковидного госпиталя по направлению ветра, а в ширину достигает 300 м. С увеличением скорости ветра до 15 м/с длина увеличивается до 1,5 км по направлению ветра, ширина — до 400 м, площадь загрязнения — приблизительно в 3 раза.

На рис. 4 (цв. вкладка) представлены изолинии при минимальной и максимальной скоростях ветра для июля в дневное время. Площадь загрязнения от ковидного госпиталя для лета при тех же значениях изолиний концентрации вируса составляет при скорости ветра 2 м/с 150 м в ширину и до 250 м по направлению ветра, с увеличением скорости

ветра до 15 м/с — до 1 км, а в ширину — до 550 м, т.е. увеличивается приблизительно в 4 раза.

Весной при увеличении скорости ветра загрязнение из круга радиусом 150 м от источника распространяется по направлению ветра до 1 км, а ширина шлейфа составляет до 400 м. Площадь загрязнения увеличивается приблизительно в 5 раз. Осенью площадь загрязнения увеличивается от 1 км до 1300 м по направлению ветра, а по ширине не изменяется и составляет 400 м, т.е. увеличивается незначительно.

Передача SARS-CoV-2 воздушно-капельным путем была предметом дискуссий в научном сообществе [1, 4, 7, 13, 15, 18, 20, 21]. Было отмечено, что важную роль играют концентрация и размер частиц, содержащих вирус. Знание о переносе аэрозолей увеличивается по мере сбора новых данных о заболевших людях во время различных массовых мероприятий [20]. В работе [31] изучалось влияние скорости окружающего ветра, относительной влажности, размера капель аэрозоля и социальной дистанции путем моделирования с применением методов вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics). Авторы пришли к выводу, что низкие скорости ветра снижают межличностную капельную передачу и, наоборот, высокая скорость ветра усугубляет риск заражения из-за адвекции. Высокая влажность снижает риск заражения на городских улицах. Из исследований, обобщенных в обзоре [32, 33], сделан вывод, что вентиляция является одним из наиболее эффективных способов контроля передачи патогенов по воздуху внутри помещения больниц, учебных корпусов и т.д. Исследований, направленных на моделирование распространения вируса COVID-19 вне помещений, не проводилось. В основном собраны статистические данные при вспышках заболеваний в разных городах, проведен анализ количества заболевших и распространения заболевания в зависимости от различных метеопараметров [19]. По этой причине провести сравнение с другими работами по моделированию распространения вируса на открытом пространстве не представляется возможным.

Заключение

Проведенные модельные расчеты аэрозольного распространения вируса для различных значений скорости его инактивации позволили соотнести показатели увеличения площади загрязнения вирусом, содержащим аэрозолем в городском ландшафте при уменьшении этого параметра. Модельные расчеты, учитывающие направление и скорость ветра, показали, что с увеличением скорости ветра площадь загрязнения может потенциально увеличиваться в 3–4 раза. Тем не менее результаты расчетов показывают, что выбросы от ковидного госпиталя не могут существенно повлиять на распространение вируса в городском ландшафте, поскольку даже в неблагоприятных метеоусловиях вирусосодержащий аэрозоль распределяется по довольно значительной площади, снижая возможные концентрации

вируса, которые могут попасть в организм человека, и, следовательно, уменьшая вероятность его инфицирования.

Разработанная программа может быть использована для оценки риска и угрозы распространения вируса при перепрофилировании терапевтического лечебного учреждения в ковидный госпиталь.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2019-1665).

Список литературы

1. *Morawska L., Milton D.K.* It is time to address airborne transmission of coronavirus disease 2019 (COVID-19) // *Clin. Infect. Dis.* 2020. V. 71. P. 2311–2313.
2. *Frieden T., Lee C.* Identifying and interrupting super-spreading events—implications for control of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 // *Emerg. Infect. Dis.* 2020. V. 26. P. 1061–1066.
3. *Miller S., Nazaroff W.W., Jimenez J.L., Boerstra A., Buonanno G., Dancer S.J., Kurnitski J., Marr L.C., Morawska L., Noakes C.* Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event // *Indoor Air.* 2021. V. 31, N 2. P. 314–323.
4. *Heneghan C., Spencer E., Brassey J., Plüddemann A., Onakpoya I.J., Evans D.H., Conly J.M., Jefferson T.* SARS-CoV-2 and the role of airborne transmission: A systematic review // *F1000Research.* 2021. V. 10:232. P. 1–72.
5. *Pan M., Lednicky J.A., Wu C.Y.* Collection, particle sizing and detection of airborne viruses // *J. Appl. Microbiol.* 2019. V. 127, N 6. P. 1596–1611.
6. *Prather K.A., Wang C.C., Schooley R.T.* Reducing transmission of SARS-CoV-2 // *Science.* 2020. V. 368, N 6498. P. 1422–1424.
7. *Wang C.C., Prather K.A., Sznitman J., Jimenez J.L., Lakdawala S.S., Tufekci Z., Marr L.C.* Airborne transmission of respiratory viruses // *Science.* 2021. V. 373, N 6558.
8. *Lewis D.* Superspreading drives the COVID pandemic – and could help to tame it // *Nature.* 2021. V. 590. P. 544–546.
9. *Doremalen N., Bushmaker T., Morris D.H., Holbrook M.G., Gamble A., Williamson B.N., Tamin A., Harcourt J.L., Thornburg N.J., Gerber S.I., Lloyd-Smith J.O., Wit E., Munster V.J.* Aerosol and surface stability of HCoV-19 (SARS-CoV-2) compared to SARS-CoV-1 // *N. Engl. J. Med.* 2020. V. 382. P. 1564–1567.
10. *Leung N.H.L.* Transmissibility and transmission of respiratory viruses // *Nat. Rev. Microbiol.* 2021. V. 19, N 8. P. 528–545.
11. *Setti L., Passarini F., De Gennaro G., Barbieri P., Pallavicini A., Ruscio M., Piscitelli P., Colao A., Miani A.* Searching for SARS-COV-2 on particulate matter: A possible early indicator of COVID-19 epidemic recurrence // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020. V. 17, N 9. P. 2986.
12. *Dyani L.* COVID-19 rarely spreads through surfaces. So why are we still deep cleaning? // *Nature.* 2021. V. 590(7844). P. 26–28.
13. *Greenhalgh T., Jimenez J.L., Prather K.A., Tufekci Z., Fisman D., Schooley R.* Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2 // *Lancet.* 2021. V. 397. P. 1603–1605.
14. *Lewis D.* The challenges of making indoors safe // *Nature.* 2021. V. 592. P. 22–25.
15. *Tang J.W., Bahnfleth W.P., Bluysen P.M., Buonanno G., Jimenez J.L., Kurnitski J., Li Y., Miller S., Sekhar C., Morawska L., Marr L.C., Melikov A.K., Nazaroff W.W., Nielsen P.V., Tellier R., Wargocki P., Dancer S.J.* Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2) // *J. Hosp. Infect.* 2021. V. 110. P. 89–96.
16. *Gomes da Silva P., Gonçalves J., Nascimento M.S.J., Sousa S.I.V., Mesquita J.R.* Detection of SARS-CoV-2 in the indoor and outdoor areas of urban public transport systems of three major cities of Portugal in 2021 // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022. V. 19, N 10. P. 5955.
17. *Nishiura H., Oshitani H., Kobayashi T., Saito T., Sunagawa T., Matsui T., Wakita T., MHLW COVID-19 Response Team, Suzuki M.* Closed environments facilitate secondary transmission of coronavirus disease 2019 (COVID-19) // *The preprint server for Health Sciences: medRxiv.* 2020. DOI: 10.1101/2020.02.28.20029272.
18. *Tsang T.-W., Mui K.-W., Wong L.-T.* Computational Fluid Dynamics (CFD) studies on airborne transmission in hospitals: A review on the research approaches and the challenges // *J. Build. Eng.* 2022. V. 63(A). P. 105533.
19. *Lijun M., Guoqing Hu, Meng Y., Cui Z., Chunliang Z., Xinli Li.* Research progress on the impact of environmental meteorological factors on the spread of novel coronavirus pneumonia // *J. Occup. Environ. Med.* 2022. V. 39, N 3. P. 348–352.
20. *Dinoi A., Feltracco M., Chirizzi D., Trabucco S., Conte M., Gregoris E., Barbaro E., La Bella G., Ciccicarese G., Belosi F., La Salandra G., Gambaro A., Contini D.* A review on measurements of SARS-CoV-2 genetic material in air in outdoor and indoor environments: Implication for airborne transmission // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 809, 151137. P. 1–15.
21. *Huang J., Jones P., Zhang A., Hou S.S., Hang J., Spengler J.D.* Outdoor airborne transmission of coronavirus among apartments in high-density cities // *Front. Built Environ.* 2021. V. 7:666923. P. 1–19.
22. *Piazzola J., Bruch W., Desnues C., Parent P., Yohia C., Canepa E.* Influence of meteorological conditions and aerosol properties on the COVID-19 contamination of the population in coastal and continental areas in France: Study of offshore and onshore winds // *Atmosphere.* 2021. V. 12, N 4. P. 523.
23. *Голиков Р.А., Суржигов Д.В., Кислицына В.В., Штайгер В.А.* Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения (обзор литературы) // *Научное обозрение. Медицинские науки.* 2017. № 5. С. 20–31.
24. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч. 1. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965. 639 с.
25. *Бородулин А.И.* Измерение тензора коэффициентов турбулентной диффузии в атмосфере и его некоторые свойства // *Оптика атмосф. и океана.* 1996. Т. 9, № 6. С. 832–836.
26. *Теверовский Е.Н., Дмитриев Е.С.* Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. М.: Энергоатомиздат. 1988. 160 с.
27. *Бородулин А.И., Десятков Б.М.* Моделирование распространения примесей в пограничном слое атмосферы. Новосибирск: Новосибир. гос. ун-т, 2007. 376 с.
28. *Шлычков В.А., Бородулин А.И., Десятков Б.М.* Численное моделирование циркуляции воздуха и переноса

- примеси в городских условиях с явным учетом ландшафта // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 6. С. 552–556.
29. *Бородулин А.И., Десятков Б.М., Ярыгин А.А.* Модель распространения атмосферных примесей в пограничном слое атмосферы. Программа для ЭВМ. 2006. Зарегистрирована Федеральным Институтом промышленной собственности Роспатента. Рег. номер 2007610293. 16 января 2007 г.
 30. *Dabisch P., Schuit M., Herzog A., Beck K., Wood S., Krause M., Miller D., Weaver W., Freeburger D., Hooper I., Green B., Williams G., Holland B., Bohannon J., Wahl V., Yolitz J., Hevey M., Ratnesar-Shumate S.* The influence of temperature, humidity, and simulated sunlight on the infectivity of SARS-CoV-2 in aerosols // *Aerosol Sci. Technol.* 2020. V. 55, N 2. P. 142–153.
 31. *Fan X., Zhang X., Weerasuriya A.U., Hang J., Zeng L., Luo Q., Li C.Y., Chen Z.* Numerical investigation of the effects of environmental conditions, droplet size, and social distancing on droplet transmission in a street canyon // *Build. Environ.* 2022. V. 221. Article 04059.
 32. *Peng S., Chen Q., Liu E.* The role of computational fluid dynamics tools on investigation of pathogen transmission: Prevention and control // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 746. P. 142862.
 33. *Oksanen L., Auvinen M., Kuula J., Malmgren R., Romantschuk M., Hyvärinen A., Laitinen S., Maunula L., Sanmark E., Geneid A., Sofieva S., Salokas J., Veskiäli H., Sironen T., Grönholm T., Hellsten A., Atanasova N.* Combining Phi6 as a surrogate virus and computational large-eddy simulations to study airborne transmission of SARS-CoV-2 in a restaurant // *Int. J. Indoor Environ. Health.* 2022. V. 32, N 11. P. e13165.

N.A. Lapteva, A.S. Safatov, A.P. Agafonov. **Simulation of the SARS-CoV-2 virus containing aerosol particles spread around a hospital.**

The new coronavirus pneumonia has rapidly spread around the world. The World Health Organization emphasized that the SARS-CoV-2 coronavirus spreads mainly between people who are in close contact with each other, as well as in the case of touching contaminated surfaces followed by touching the eyes, nose, or mouth without first cleaning the hands. Possible permanent sources of the spread of the virus can be gathering of patients in hospitals in the case of non-compliance with the requirements for organizing the functioning of a hospital. Meteorological conditions can be a key factor influencing the spread of the virus in the case of an accidental release of virus-containing aerosol from such a hospital. Simulations are carried out with modern methods for solving a system of differential equations of the atmospheric boundary layer, which are adapted to describe the distribution of harmful atmospheric impurities over a real complex terrain considering urban buildings of various heights, forests, reservoirs, changing meteorological conditions, and many other factors.

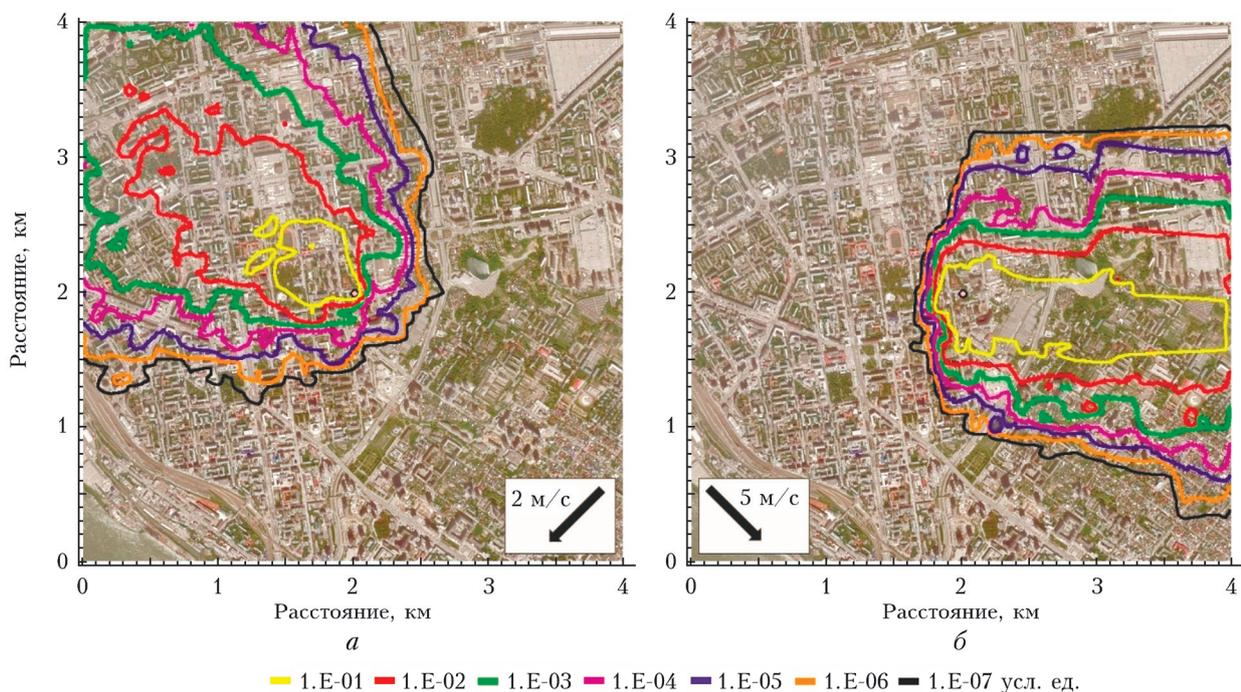


Рис. 1. Примеры моделирования распространения аэрозоля (изолинии концентрации вируса, усл. ед.) без учета скорости инактивации вируса: *a* – ветер северо-восточный, 2 м/с (день, январь); *б* – ветер северо-западный, 5 м/с (ночь, октябрь)

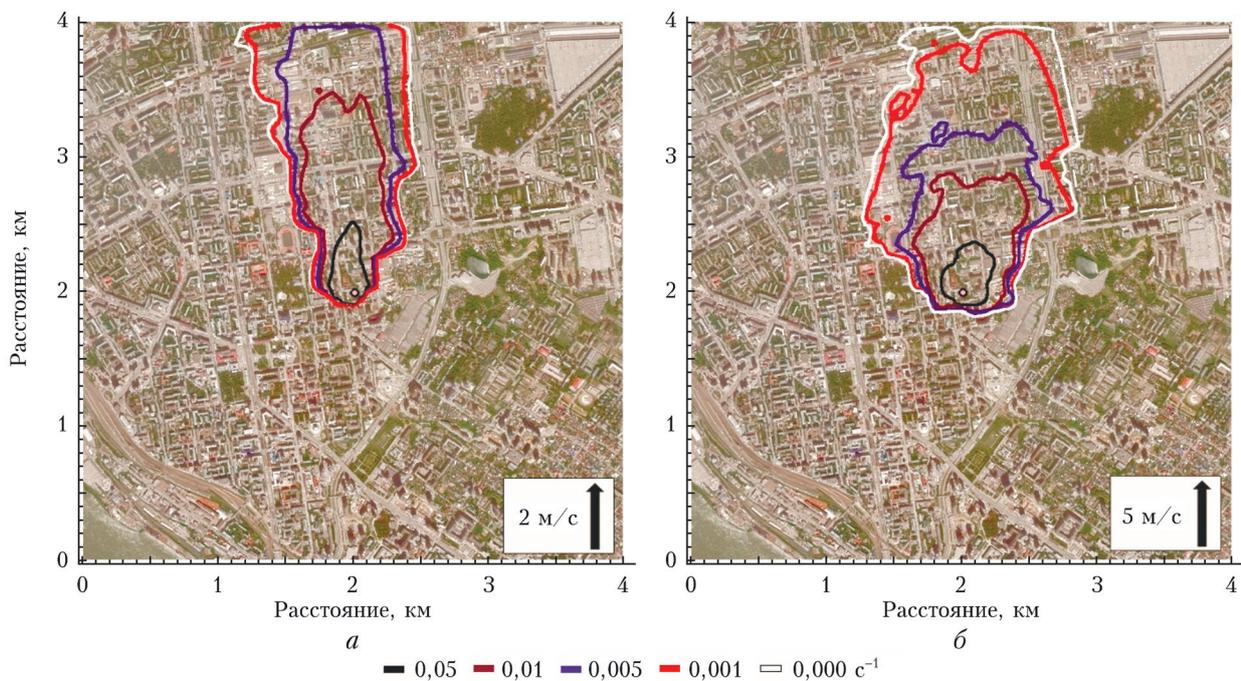


Рис. 2. Изолинии концентрации вируса 10^{-3} усл. ед. для коэффициентов скорости инактивации: 0,000; 0,001; 0,005; 0,010 и 0,05 с⁻¹, южное направление ветра (день): *a* – скорость ветра 2 м/с (январь); *б* – 5 м/с (июль)

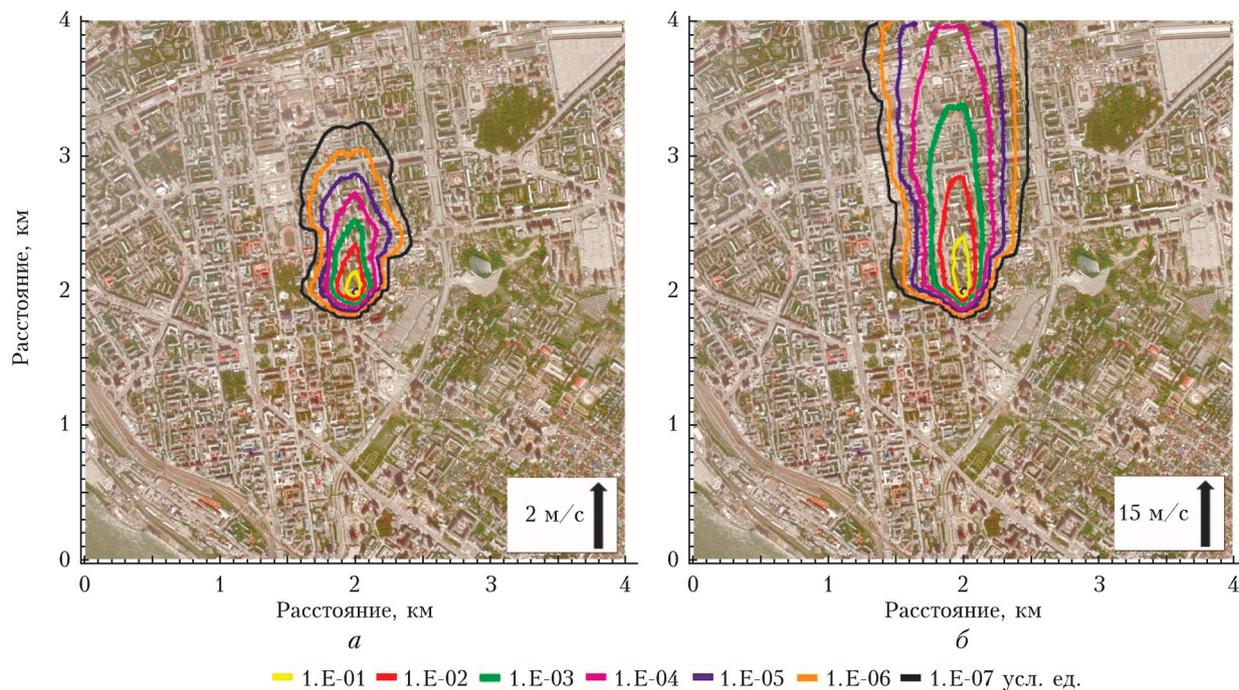


Рис. 3. Изолинии концентрации вируса (усл. ед.) для коэффициента скорости инактивации $0,05 \text{ с}^{-1}$ (январь, день): *a* – скорость ветра 2 м/с; *б* – 15 м/с

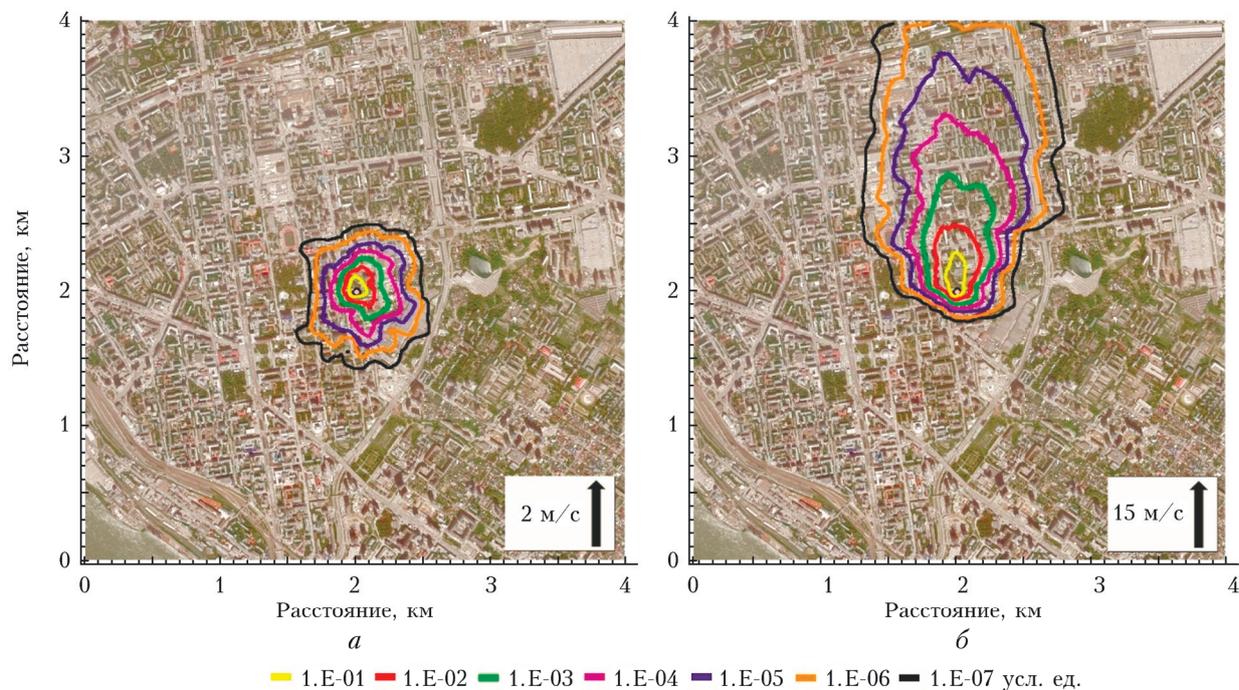


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для июля