

**Математическое моделирование и прогнозирование распространения загрязняющих веществ в урбанизированных территориях**

© 2025. П. А. Мельников<sup>1</sup>, к. т. н., директор института,  
А. В. Болотин<sup>1</sup>, к. х. н., доцент,  
Д. А. Волков<sup>1</sup>, заведующий базовой кафедрой,  
И. В. Петров<sup>2</sup>, исполнительный директор,

<sup>1</sup>Тольяттинский государственный университет,  
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14,

<sup>2</sup>Исследовательский центр робототехники «Аиралаб Рус»,  
445043, Россия, г. Тольятти, Южное шоссе, д. 165-а,  
e-mail: bolotin1979alexander@yandex.ru, ip@aira.life

Мониторинг атмосферного воздуха в крупных городах является важной задачей, направленной на защиту здоровья населения и поддержку устойчивого развития территорий. Высокая плотность населения, интенсивное движение транспорта и значительная промышленная активность в городах создают предпосылки для высокого уровня загрязнения воздуха, что влечёт за собой серьёзные последствия для здоровья людей и окружающей среды. В статье проанализирован опыт использования данных сети мониторинга, сформированной с помощью датчиков непрерывного действия по контролю взвешенных частиц PM2.5 и PM10 и оценена возможность их использования в качестве инструмента предиктивных действий в работе аккредитованных лабораторий надзорных и контрольных органов. Особое внимание уделено разработке математических моделей, описывающих процессы распространения аэродисперсных систем под влиянием гидрометеорологических условий. Применение этих моделей позволяет прогнозировать изменения концентраций загрязняющих веществ, что создаёт основу для принятия превентивных мер и снижения риска воздействия на уязвимые группы населения. Предложенный подход позволяет контролирующим органам оперативно реагировать на возникающие превышения нормативов, определять возможные источники загрязнения и вырабатывать управленческие решения для улучшения экологической обстановки. Предложенные методики и аналитические инструменты могут стать основой для развития интерактивных карт экологического состояния с возможностью публичного доступа, что позволит повысить доверие населения к мерам экологического контроля и стимулировать участие граждан в процессе улучшения качества окружающей среды. Эти разработки также в дальнейшем могут обеспечивать учёт фоновой нагрузки загрязняющих веществ в режиме реального времени, помогая предприятиям адаптировать свою деятельность и планировать производственные процессы с учётом экологических факторов, что приведёт к снижению антропогенной нагрузки на города и прилегающие территории. Результаты исследований апробированы на территории города Тольятти и используются в работе аккредитованной передвижной экологической лаборатории, которая проводит анализ атмосферного воздуха более чем по 50 параметрам.

**Ключевые слова:** атмосферный воздух, загрязняющие вещества, мониторинг, предиктивная аналитика, имитационное моделирование.

**Mathematical modeling and forecasting  
of the spread of pollutants in urbanized areas**

© 2025. P. A. Melnikov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0005-7343-658X, A. V. Bolotin<sup>1</sup> ORCID: 0009-0007-8720-3677,  
D. A. Volkov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0004-9325-6095, I. V. Petrov<sup>2</sup> ORCID: 0009-0004-3188-7369,

<sup>1</sup>Togliatti State University,

14, Belorusskaya St., Togliatti, Russia, 445020,

<sup>2</sup>“Airalab Rus” Robotics Research Center,

165-а, Yuzhnoye shosse, Togliatti, Russia, 445043,

e-mail: bolotin1979alexander@yandex.ru, ip@aira.life

Air monitoring in large cities is a crucial task aimed at protecting public health and supporting the sustainable development of urban areas. High population density, intense traffic, and significant industrial activity in cities contribute to high levels of air pollution, leading to serious consequences for human health and the environment. This paper analyzes the experience of using monitoring network data generated by continuous sensors for monitoring suspended particles PM2.5

and PM10 and assesses the potential of using this data as a predictive action tool in the work of accredited laboratories of regulatory and supervisory authorities. Special attention is paid to the development of mathematical models describing aerosol systems dispersion processes in different hydrometeorological conditions. The application of these models makes it possible to predict changes in pollutant concentrations, forming a basis for preventive measures and reducing the risk of exposure to vulnerable population groups. The proposed approach allows regulatory authorities to promptly respond to the excess of standards, identify potential sources of pollution, and develop management solutions to improve the environmental situation. The proposed methodologies and analytical tools could serve as a basis for developing interactive maps of the environmental status. Public access to the above maps will enhance public trust in environmental control measures and encouraging citizen participation in efforts to improve environmental quality. These developments could also facilitate real-time monitoring of background pollutant levels, helping enterprises adjust their operations and plan production processes with environmental factors in mind, thereby reducing anthropogenic pressure on cities and surrounding areas. The research results were tested in Tolyatti and are used by a mobile environmental laboratory capable of analyzing atmospheric air across more than 50 parameters and accredited within the national accreditation system.

**Keywords:** atmospheric air, pollutants, monitoring, predictive analytics, simulation modeling.

Мониторинг атмосферного воздуха урбанизированных территорий имеет большое значение для защиты здоровья населения и обеспечения устойчивого развития территорий. Высокая плотность населения, транспортные потоки и промышленная деятельность в городах зачастую приводят к значительному загрязнению воздуха, которое может иметь серьёзные последствия для здоровья человека и окружающей среды.

Как показано в работах [1–3], загрязнение воздуха напрямую связано с рядом респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний, включая астму, хроническую обструктивную болезнь лёгких, болезни сердца и т. д. Согласно работам [4, 5], взвешенные частицы PM2.5, PM10 (частицы, диаметр которых составляет 2,5 мкм и 10 мкм, соответственно) являются крайне опасными загрязнителями воздуха, поскольку они могут проникать глубоко в лёгкие и вызывать воспаление и другие повреждения. Также немаловажно отметить, что загрязнение воздуха может нести значительные экономические последствия, такие как потеря трудовых ресурсов, связанных с болезнями сотрудников, снижение производительности труда, и, как следствие, снижение экономической эффективности производственных процессов. Кроме того, загрязнение воздуха может повредить здания [6], нанести ущерб урожаю [7] и снизить туристическую значимость [8].

Система мониторинга атмосферного воздуха крупных городов в основном включает в себя два следующих основных компонента:

- стационарные посты мониторинга, как правило, подведомственные службе Росгидромета, осуществляющие измерение концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферном воздухе с определённой периодичностью;

- мобильные средства измерений, которые могут быть использованы для целевого мони-

торинга источников загрязнения в определённых районах.

При этом концентрации ЗВ в воздухе могут значительно варьировать в зависимости от местоположения и времени суток [9, 10]. Это связано с метеорологическими условиями, такими как ветер, температура и осадки, а также с деятельностью человека, например, с утренним и вечерним трафиком или определёнными активностями промышленных объектов. Данные обстоятельства существенно затрудняют организацию мониторинга атмосферного воздуха, поскольку проверяющие и контролирующие органы могут запаздывать с процессом измерения и не зафиксировать факт превышения ПДК на контролируемой территории [11]. При проведении измерений необходимо не только установить факт превышения ПДК ЗВ, но и идентифицировать предприятия, деятельность которых привела к ухудшению качества атмосферного воздуха, что не всегда получается реализовать на практике. Данные обстоятельства вызывают недовольство жителей, связанное с качеством атмосферного воздуха, и зачастую вызывают недоверие у населения к официальным органам власти, что побуждает заинтересованные стороны искать альтернативные подходы к мониторингу атмосферного воздуха. К тренду в области мониторинга атмосферного воздуха в мире можно отнести развитие онлайн-сети наблюдения [12, 13]. Получаемые данные с подобных сетей могут носить информационный характер и в силу действующего законодательства (Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ) не являются инструментом привлечения к ответственности организаций, деятельность которых привела к ухудшению качества атмосферного воздуха. Однако подобные онлайн-сети мониторинга могут быть хорошим инструментом для прогнозирования состояния атмосферного воздуха и обеспечи-

вать предиктивные действия проверяющих органов за счёт построения прогнозных моделей.

Критический анализ существующих методик математического моделирования распространения ЗВ в атмосферном воздухе [14–16] позволил выделить их общий недостаток, а именно, сложность и громоздкость количественных расчётов, а также необходимость применения вычислительных экспериментов. Указанное обстоятельство является побудительной причиной искать альтернативный подход к построению методик прогнозирования распространения ЗВ в атмосферном воздухе, с помощью которых стало бы возможно получить приблизительные аналитические соотношения, позволяющие оценить особенности динамики процессов без применения громоздких уравнений, равно как и вычислительной техники.

В связи с отмеченными обстоятельствами цель настоящей работы состояла в разработке математических основ, позволяющих осуществлять предиктивную аналитику и прогнозирование распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на урбанизированных территориях, базирующихся на гидрометеорологических факторах и данных онлайн-сети наблюдения, состоящей из датчиков непрерывного действия по контролю взвешенных частиц PM2.5 и PM10.

## Объекты и методы исследования

С целью прогнозирования возможных вариантов распространения атмосферных загрязнений методами математического моделирования и выполнения необходимых количественных расчётов, следя логической схеме работы [17], в данной работе использован обобщённый алгоритм составления математических моделей динамического поведения сложных физико-химических систем.

Построена простейшая математическая модель динамики распространения концентрации ЗВ во времени, содержащая две основные переменные – обобщённую концентрацию загрязняющей примеси  $\Theta(t)$  и обобщённую плотность источника загрязнений  $\rho(t)$ .

В первом приближении дифференциальное уравнение для изменения  $\Theta(t)$  при заданном законе эволюции  $\rho(t)$  может быть представлено так:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \alpha_{+1} \cdot \rho(t) - \alpha_{-1} \cdot \Theta, \quad (1)$$

где  $\alpha_{+1} \cdot \rho(t)$  – выражение, моделирующее изменение концентрации загрязняющей при-

меси  $\Theta(t)$  в зависимости от текущего значения плотности источника загрязнений  $\rho(t)$ ;  $\alpha_{-1} \cdot \Theta$  – выражение, которое моделирует уменьшение  $\Theta(t)$  (при отсутствии источника загрязнений, равно как и в результате рассеивания загрязняющей примеси);  $\alpha_{-1} = \frac{1}{\tau_{ch}}$  – «характерное время» протекающего сложного процесса («характерным временем» называют комбинацию коэффициентов системы, имеющую размерность времени);  $(\alpha_{+1}, \alpha_{-1})$  – «константы скоростей» моделируемых процессов, зависящие от различных факторов.

Для получения полного математического описания к дифференциальному уравнению вида (1) была добавлена зависимость, количественно передающая временную эволюцию переменной  $\rho(t)$ . При этом, наиболее характерными законами изменения переменных являются экспоненциальные зависимости [16].

В первом приближении предполагалось, что временная эволюция переменной  $\rho(t)$  удовлетворяла закону типа «радиоактивного распада», то есть экспоненциально уменьшалось с течением времени:

$$\rho(t) = \rho_0 e^{-\alpha_{+1} t}. \quad (2)$$

Комбинируя уравнения (1) и (2), получаем эволюционное уравнение для концентрации загрязняющей примеси следующего вида:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \alpha_{+1} \cdot \rho_0 \cdot e^{-\alpha_{+1} t} - \alpha_{-1} \cdot \Theta. \quad (3)$$

Воспользовавшись преобразованием по Лапласу приходим, вместо (3), к такому результату:

$$\Theta(s) = \frac{\alpha_{+1} \cdot \rho_0}{(\alpha_{+1} + s)(\alpha_{-1} + s)}, \quad (4)$$

где  $\Theta(s) = \int_0^\infty \Theta(t) \cdot e^{-st} dt$  – преобразование Лапласа  $\Theta(t)$ .

Для идеализированного частного случая, когда  $\alpha_{+1} = \alpha_{-1} = \alpha$  (случай состояния термодинамического равновесия рассматриваемой физико-химической системы), обратное преобразование Лапласа приводит к уравнению для временной эволюции обобщённой концентрации загрязняющей примеси  $\Theta(t)$ :

$$\Theta(t) = \rho_0 \cdot \alpha \cdot t \cdot e^{-\alpha t}. \quad (5)$$

В более общем случае, когда  $\alpha_{+1} \neq \alpha_{-1}$ , разлагая на простые дроби и применяя обратное

преобразование Лапласа, получаем уравнение для  $\Theta(t)$  вида:

$$\Theta(t) = \frac{\alpha_{+1} \cdot \rho_0}{\alpha_{-1} - \alpha_{+1}} [e^{-\alpha_{+1}t} - e^{-\alpha_{-1}t}]. \quad (6)$$

Данное уравнение для концентрационного распределения ЗВ  $\Theta(t)$  (6) превращается в соотношение (5) при  $\alpha_{+1} = \alpha_{-1} = \alpha$ .

В итоге получается:

$$\begin{aligned} \Theta(t) &= \frac{\alpha_{+1} \cdot \rho_0}{\alpha_{-1} - \alpha_{+1}} [e^{-\alpha_{+1}t} - e^{-\alpha_{-1}t}] = \\ &= \frac{\alpha_{+1} \cdot \rho_0 \cdot e^{-\alpha_{+1}t}}{\alpha_{-1} - \alpha_{+1}} [1 - e^{-(\alpha_{-1} - \alpha_{+1})t}] \end{aligned} \quad (7)$$

Принимая во внимание справедливость приближённой зависимости (для малых временных интервалов протекания моделируемого процесса), получаем:

$$1 - e^{-(\alpha_{-1} - \alpha_{+1})t} \approx (\alpha_{-1} - \alpha_{+1})t,$$

и

$$\begin{aligned} \Theta(t) &= \frac{\alpha_{+1} \cdot \rho_0 \cdot e^{-\alpha_{+1}t}}{\alpha_{-1} - \alpha_{+1}} [1 - e^{-(\alpha_{-1} - \alpha_{+1})t}] \approx \\ &\approx \rho_0 \cdot \alpha \cdot t \cdot e^{-\alpha t} \end{aligned}$$

Из уравнения для временной эволюции концентрационного распределения ЗВ  $\Theta(t)$ , записанного в виде (5), можно получить аналитическое выражение для критического времени, начиная с которого величина  $\Theta(t)$  будет превышена, что приведёт к нарушению действующего экологического законодательства.

Взяв производную по времени от выражения (5) и приравняв её к нулю

$$\frac{d\Theta}{dt} = \alpha \cdot \rho_0 \cdot (-\alpha \cdot e^{-\alpha t} \cdot t + e^{-\alpha t}) = 0$$

получаем аналитическое выражение для критического времени:

$$\tau_{\text{крит.}} = \frac{1}{\alpha}. \quad (8)$$

Значения кинетических констант  $\alpha_{+1}$  и  $\alpha_{-1}$  подлежат экспериментальному определению, что, однако, не входило в круг задач, решаемых

в настоящей работе. Поэтому, в приближённых расчётах можно использовать типичные численные значения констант скоростей, принимая во внимание характерные временные масштабы моделируемых процессов [18]. Под типичными численными значениями понимают значения параметров соответствующих величин по порядку величины, которые используются для качественного анализа особенностей временной эволюции сложных систем различной физической природы.

Принимая за основу характерный временной масштаб течения процессов распространения ЗВ в воздухе (час<sup>-1</sup>), можно получить зависимость значений критического времени от начального значения кинетической константы  $\alpha$  (табл.).

Приведённые в таблице численные значения  $\tau_{\text{крит.}}$  иллюстрируют динамику изменения предельного времени, свыше которого выезд передвижной экологической лаборатории окажется неэффективным.

Считая, что в первом приближении скорость и направления ветра  $v$  постоянны, можно приближённо оценить характерное расстояние распространения концентраций ЗВ по следующей формуле:

$$t = x/v \text{ и } x = t \cdot v. \quad (9)$$

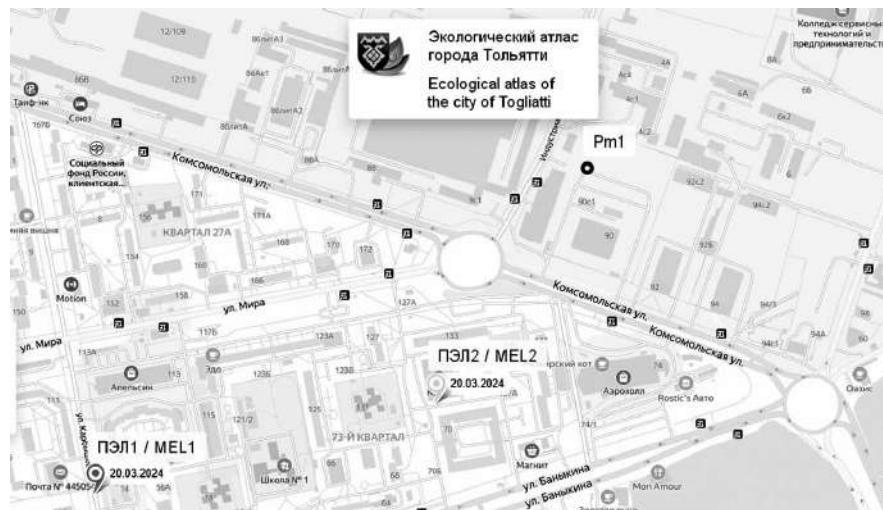
## Результаты и обсуждение

Для оценки математических моделей, описывающих распространение аэродисперсных систем, рассмотрены данные, полученные в процессе мониторинга атмосферного воздуха на территории г. Тольятти, сопоставлен график датчиков онлайн-сети наблюдения [12] с результатами работы передвижной экологической лаборатории [11, 19]. В работе [11] описан принцип работы передвижной лаборатории, которая совершает выезды при поступлении жалоб от населения.

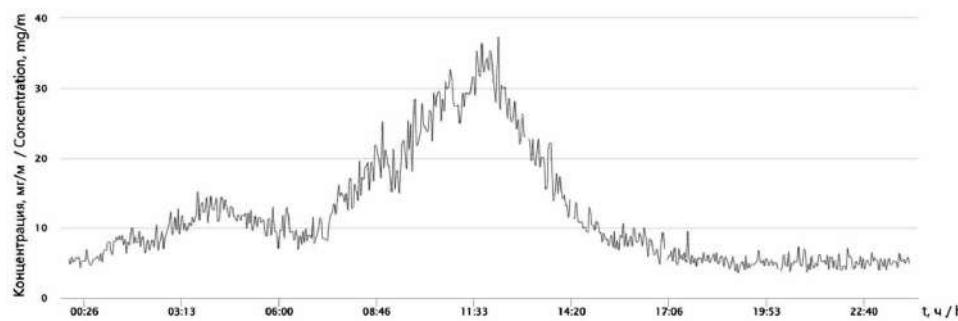
За период наблюдения 2023–2024 гг. в качестве примера рассмотрены результаты работы передвижной экологической лаборатории от 20 марта 2024 г. [19]. Из 8 совершенных контрольных замеров в одном пункте зафиксировано превышение значений по аммиаку

Таблица / Table

Зависимость значения критического времени от начальной величины кинетической константы $\alpha$ Dependence of the critical time value on the initial value of the kinetic constant $\alpha$														
$\tau_{\text{крит.}}$ , ч. / h	10	5	3,33	2,5	2,0	1,67	1,43	1,25	1,11	1,0	0,91	0,83	0,77	0,71
$\alpha$ , ч <sup>-1</sup> / h <sup>-1</sup>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4



**Рис. 1.** Участок г. Тольятти, на котором зафиксировано превышение концентрации по аммиаку 20.03.2024; ПЭЛ1 и ПЭЛ2 – пункты измерений передвижной экологической лаборатории, Pm1 – ближайший датчик онлайн-сети наблюдения / **Fig. 1.** Togliatti's site, where ammonia excess concentration was recorded on 20.03.2024; MEL1 and MEL2 are the measurement points of the mobile environmental laboratory, Pm1 is the nearest sensor of an online surveillance network



**Рис. 2.** Графики концентрации микрочастиц PM10 ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) на основании измерений датчика PM1 онлайн-сети наблюдения  
**Fig. 2.** PM10 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) microparticle concentration plots based on sensor measurements PM1 online surveillance network

(рис. 1). На данном участке города отображены два контрольных пункта передвижной экологической лаборатории, при этом в контрольном пункте «ПЭЛ2» имеется превышение ПДК (в момент измерения ветер был восточным со скоростью 0,8 м/с). Превышение составило по аммиаку – 1,1 ПДК. При этом на достаточно высоком уровне, не типичном для городской среды г. Тольятти [12], находились концентрации следующих веществ: взвешенные частицы – 0,63 ПДК<sub>м.р.</sub>, оксид углерода – 0,62 ПДК<sub>м.р.</sub>, диоксид азота – 0,67 ПДК<sub>м.р.</sub>.

Передвижная экологическая лаборатория работала по жалобам населения, превышение в пункте ПЭЛ2 зафиксировано в 11 ч 17 мин. по местному времени. Измерения в пункте ПЭЛ1 произведены в 23 ч 49 мин. и превышений концентрации ЗВ передвижной

экологической лабораторией выявлено не было.

На рисунке 2 представлены результаты онлайн-сети наблюдения за период 00:00–24:00 ч за 20 марта 2024 г.

Анализируя поведение графика на рисунке 2 и пользуясь выведенными ранее соотношениями (5), построены концентрационные профили загрязняющих примесей в зависимости от изменения основных управляемых параметров  $\alpha$  и  $\rho_0$ .

На рисунке 3 в качестве примера приведена временная эволюция концентрации загрязняющих примесей  $\Theta(t)$  в соответствии с упрощённым распределением – уравнением (5). Пользуясь такими графическими зависимостями, можно определять значения времени выезда передвижной лаборатории к месту предполагаемого загрязнения. Указан-

ные значения могут быть также определены по приближённой аналитической зависимости (8), либо по точной формуле, при  $\alpha_{+1} \neq \alpha_{-1}$ :

$$\tau_{\text{крит.}} = \frac{\ln(\frac{\alpha_{-1}}{\alpha_{+1}})}{\alpha_{-1} - \alpha_{+1}} \quad (10)$$

В этом случае для построения типичных (при  $\rho_0=30 \text{ мг}/\text{м}^3$  и  $\alpha=0,5 \text{ час}^{-1}$ ) концентрационных профилей ЗВ надлежит пользоваться законом временной эволюции вида (6).

Количественные расчёты показывают, что с увеличением начального значения плотности источника загрязнений наблюдается линейный рост максимально возможной концентрации ЗВ (рис. 4).

Как видно из рисунка 3, резкий подъём  $\Theta(t)$  (при  $\alpha < 1$ ) наблюдается на протяжении 2 ч до достижения критического времени ( $\tau_{\text{крит.}}$ ), при котором имеет место превышение концентраций ЗВ, измеряемых передвижной экологической лабораторией. Более того, по-

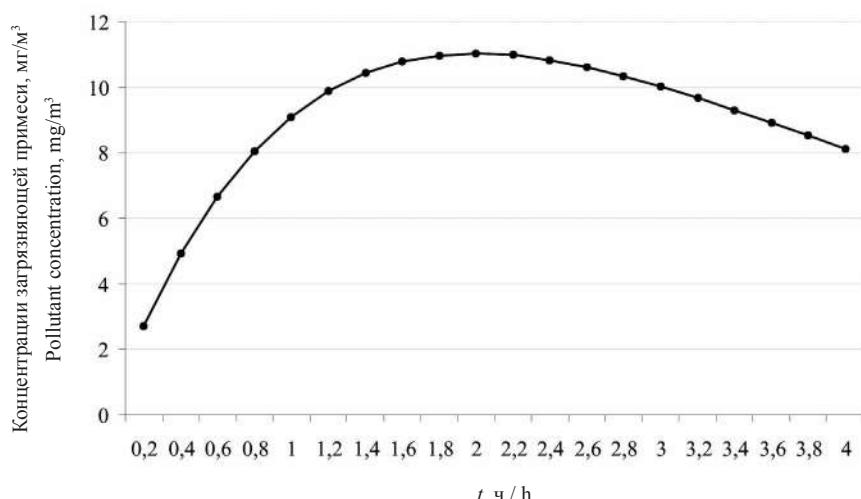


Рис. 3. Временная эволюция профиля концентрации загрязняющей примеси  $\Theta(t)$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ), рассчитанная по уравнению (5) при  $\rho_0=30 \text{ мг}/\text{м}^3$  и  $\alpha=0,5 \text{ ч}^{-1}$

Fig. 3. Time evolution of the pollutant concentration profile  $\Theta(t)$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), calculated from equation (5) at  $\rho_0=30 \text{ mg}/\text{m}^3$  and  $\alpha=0.5 \text{ h}^{-1}$

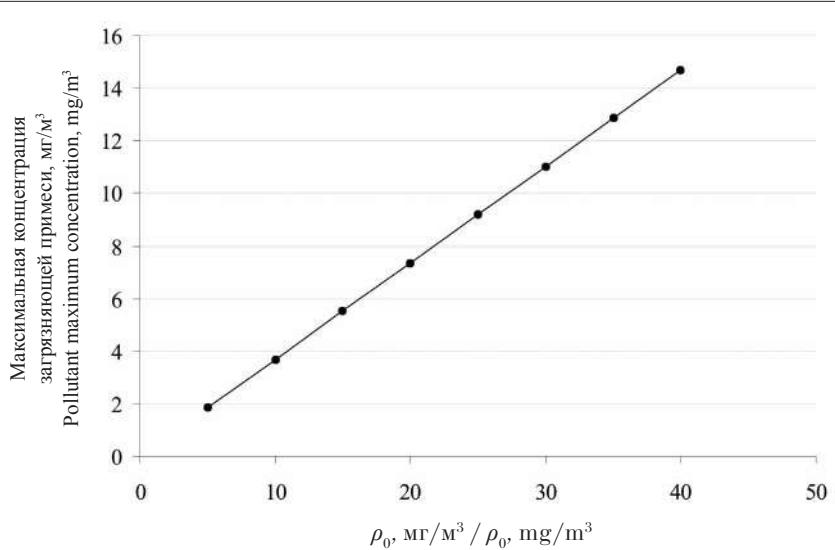
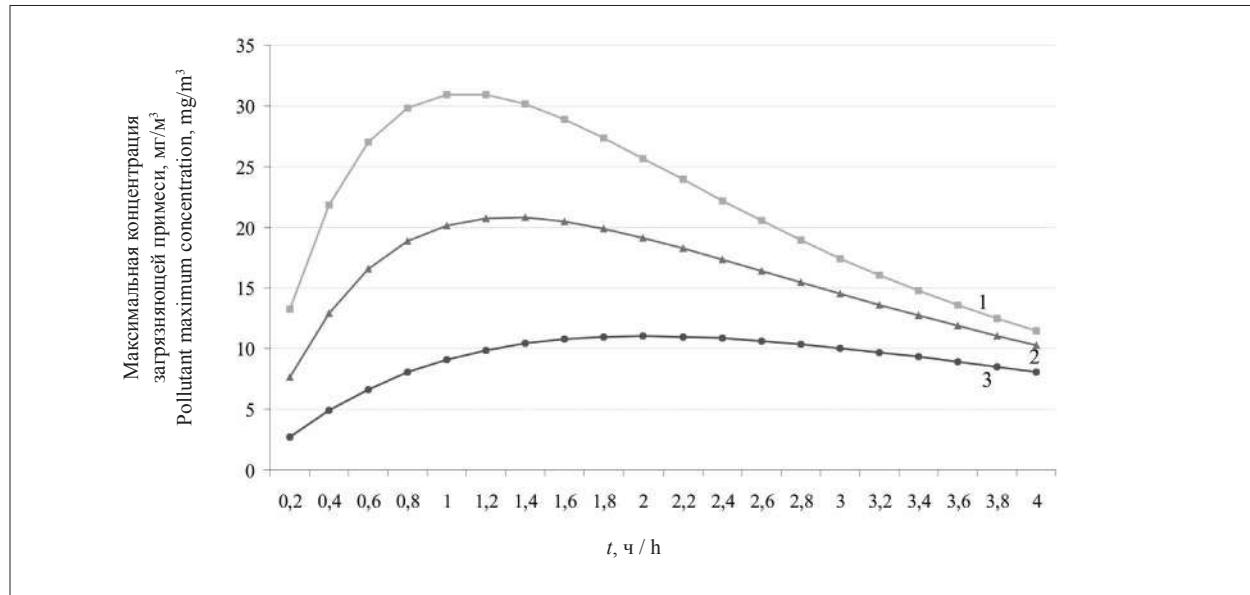


Рис. 4. Зависимость максимальной концентрации загрязняющей примеси  $\Theta_m(t)$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) от начального значения плотности источника загрязнений при  $\alpha=0,5 \text{ ч}^{-1}$  и  $\tau_{\text{крит.}}=2 \text{ ч}$ , рассчитанная по уравнению (5) / Fig. 4. Dependence of the pollutant maximum concentration  $\Theta_m(t)$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) on the initial value of the pollutant source density at  $\alpha=0.5 \text{ h}^{-1}$  and  $\tau_{\text{crit.}}=2 \text{ h}$ , calculated by equation (5)



**Рис. 5.** Эволюция временных концентрационных распределений загрязняющих веществ в зависимости от вариации параметра  $\alpha$ : 1 –  $0,5 \text{ ч}^{-1}$  ( $\alpha < 1$ ); 2 –  $1,0 \text{ ч}^{-1}$  ( $\alpha = 1$ ); 3 –  $1,2 \text{ ч}^{-1}$  ( $\alpha > 1$ )

**Fig. 5.** Evolution of time concentration distributions of pollutants depending on parameter  $\alpha$  variations: 1 –  $0.5 \text{ h}^{-1}$  ( $\alpha < 1$ ); 2 –  $1.0 \text{ h}^{-1}$  ( $\alpha = 1$ ); 3 –  $1.2 \text{ h}^{-1}$  ( $\alpha > 1$ )

лученный расчётный профиль  $\Theta(t)$  представляет собой кривую с максимумом, которая качественно и количественно верно отражает ход экспериментальной кривой, изображённой на рисунке 2. Это означает наличие корреляции между теоретическими и экспериментальными результатами. Увеличение параметра  $\alpha$  приводит к сокращению критического времени ( $\tau_{\text{крит.}}$ ), о чём свидетельствуют графические зависимости, рассчитанные для трёх важных случаев ( $\alpha < 1$ ;  $\alpha = 1$  и  $\alpha > 1$ ), и показанные на рисунке 5. Учитывая текущую скорость ветра, по формулам (8) и (9) можно определить численное значение «характерных расстояний», на которых будут фиксироваться максимальные концентрации загрязняющих примесей.

Таким образом, следует отметить, что выведенные соотношения (5), (6), (8–10) целесообразно использовать в качестве теоретической основы при разработке стратегии работы передвижной экологической лаборатории и надзорных органов, поскольку общепринятый принцип работы, базирующийся на совершении выездов на основании поступающих жалоб от населения [12], показывает свою неэффективность, потому что далеко не после каждой жалобы населения выявляется превышение концентрации ЗВ, что связано со сложным характером динамических изменений в атмосферном воздухе, которые отражают именно эволюционные законы вида (5) или (6).

## Заключение

Вопросы мониторинга и контроля качества атмосферного воздуха требуют поиска новых подходов. Предложенные в статье математические модели, позволяющие моделировать процесс распространения ЗВ в атмосфере и прогнозировать изменение качества атмосферного воздуха на урбанизированных территориях, позволяют обеспечить следующие эффекты:

- локализовать (определить местоположение) источника сверхнормативного выброса ЗВ проверяющим и надзорным органам;
- прогнозировать качество атмосферного воздуха, предоставляя информацию в открытом доступе населению селитебных территорий с целью принятий оптимальных решений по предполагаемым активностям;
- предприятиям в своей деятельности учитывать текущую фоновую нагрузку ЗВ и метеорологические условия, что позволит в режиме «онлайн» регулировать технологические мощности и проведение ремонтных работ с целью уменьшения антропогенной нагрузки.

По мере развития ИТ-технологий и цифровизации общества предложенные математические модели могут лежать в основу создания интерактивной карты, отображающей данные о состоянии окружающей среды с возможностью предиктивной аналитики и выработки оптимальных управленческих решений.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-29-10135, <https://rscf.ru/project/23-29-10135/>. The research was supported by the RSF grant No. 23-29-10135, <https://rscf.ru/project/23-29-10135/>.*

## Литература

1. Лещук С.И., Суркова И.В., Сенкевич Н.В. Взаимосвязь загрязнения окружающей среды и экологически обусловленной заболеваемости населения на территории техногенного загрязнения // Естественные и технические науки. 2017. № 1 (103). С. 23–33.
2. Литвинова Н.А., Молотилова С.А. Влияние выбросов автотранспорта на заболеваемость и риск здоровью населения г. Тюмени // Экология человека. 2018. № 8. С. 11–16.
3. Абашев Т.Э., Ашихмина Т.Я., Хето М.Х. Сравнительная экологическая оценка техногенного воздействия на воздушный бассейн территории Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 2. С. 35–47. doi: 10.25750/1995-4301-2024-2-035-047
4. Тихонова И.В., Землянова М.А., Кольдубекова Ю.В., Пескова Е.В., Игнатова А.М. Гигиеническая оценка аэрогенного воздействия взвешенных веществ на заболеваемость детей болезнями органов дыхания в зоне влияния выбросов металлургического производства // Анализ риска здоровью. 2020. № 3. С. 61–69. doi: 10.2166/health.risk/2020.3.07
5. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Игнатова А.М., Кольдубекова Ю.В., Степанков М.С., Пескова Е.В. Признаки хронического воздействия повышенных концентраций PM2,5 и PM10 на параметры эритроцитов у детей // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 4. С. 184–191. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-184-191
6. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Азаров В.Н., Кузьмичев А.А. Здание, как очиститель воздуха, маркер его загрязнённости и объект видеоэкологии // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2020. № 1 (29). С. 69–84. doi: 10.21869/2311-1518-2020-29-1-69-84
7. Джувеликян Х.А., Черепухина И.В. Современные проблемы природного и техногенного загрязнения окружающей среды (обзор) // Живые и биокосные системы. 2017. № 22. Статья 8.
8. Гудковских М.В. Методика комплексной оценки туристско-рекреационного потенциала // Географический вестник. 2017. № 1 (40). С. 102–116. doi: 10.17072/2079-7877-2017-1-102-116
9. Вильфанд Р.М., Щузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Нахаев М.И., Захарова П.В., Лапченко В.А. Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в московском регионе // Биосфера. 2014. Т. 6. № 4. С. 339–351.
10. Седых В.А., Куролап С.А., Беляева Л.Н., Мазуров Г.И., Козлов А.Т., Закусилов В.П. Загрязнение воздушной среды формальдегидом и оценка риска канцерогенных эффектов // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 73–79. doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-073-079
11. Мельников П.А., Гусев Д.М., Селезнева К.В., Шашенко В.А. Особенности мониторинга атмосферного воздуха крупных городов с развитой промышленностью // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 2. С. 32–37. doi: 10.18412/1816-0395-2024-2-32-37
12. АНО Исследовательский центр робототехники «Аиралаб Рус» [Электронный ресурс] <http://airalab.org/ru/air-monitoring/> (Дата обращения: 02.05.2024).
13. Макарова Н.М., Балашов А.Л., Тойгильдин А.М., Свирский А.Г. Особенности создания систем автоматического контроля загрязняющих веществ от стационарных источников выбросов // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 35–43. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-035-043
14. Замай С.С., Якубайлик О.Э. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города. Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 1998. 109 с.
15. Krupnova T.G., Bulanova A.V., Makarovskikh T.A., Herreinstein A.V. Urban air pollution modeling: a critical review // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 27–33. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-027-033
16. Зарипов Ш.Х., Марданов Р.Ф., Шарафутдинов В.Ф., Гильфанов А.К., Никоненкова Т.В. Математические модели переноса загрязнений в окружающей среде. Казань: Казан. ун-т, 2018. 47 с.
17. Ковтун В.Н., Болотин А.В. Одинаковом поведении системы  $\text{Ni}-\text{H}_2\text{SO}_4$  в области высоких анодных потенциалов в зависимости от режимов электролиза // Электрохимия. 2005. Т. 41. № 1. С. 111–115.
18. Быков В.И., Цыбенова С.Б. Нелинейные модели химической кинетики. М.: URSS: КРАСАНД, 2011. 396 с.
19. Экологический атлас городского округа Тольятти: Единая муниципальная информационная система городского округа Тольятти [Электронный ресурс] <http://emgis.ru/atlas/mel.aspx> (Дата обращения: 06.05.2024).

## References

1. Leshchuk S.I., Surkova I.V., Senkevich N.V. Interrelation of environmental pollution and environmentally caused morbidity in the territory of technogenic pollution // Natural and technical sciences. 2017. No. 1 (103). P. 23–33 (in Russian).
2. Litvinova N.A., Molotilova S.A. The influence of motor transport emissions on morbidity and health risk of the population of Tyumen city // Ekologiya cheloveka. 2018. No. 8. P. 11–16 (in Russian).
3. Abashev T.E., Ashikhmina T.Ya., Kheto M.H. Ecological assessment of technogenic impact on the air basin of the Kirov Region // Theoretical and Applied Ecology.

2024. No. 2. P. 35–47 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-2-035-047
4. Tikhonova I.V., Zemlyanova M.A., Kol'dibekova Yu.V., Peskova E.V., Ignatova A.M. Hygienic assessment of aerogenic exposure to particulate matter and its impacts on morbidity with respiratory diseases among children living in a zone influenced by emissions from metallurgic production // *Health Risk Analysis*. 2020. No. 3. P. 61–69 (in Russian). doi: 10.21668/health.risk/2020.3.07
5. Zaitseva N.V., Zemlianova M.A., Ignatova A.M., Koldibekova Yu.V., Stepankov M.S., Peskova E.V. Indicators of chronic exposure to elevated concentrations of PM2.5 and PM10 on parameters of children's red blood cells // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 4. P. 184–191 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-184-191
6. Ilyichev V.A., Kolchunov V.I., Azarov V.N., Kuzmichev A.A. Building like an air cleaner, a marker of its contamination and a video ecology facility // *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. 2020. No. 1. P. 69–84 (in Russian). doi: 10.21869/2311-1518-2020-29-1-69-84
7. Dzhuvelikyan H.A., Cherepukhina I.V. Modern problems of natural and technogenic pollution of the environmental (review) // *Living and bio-abiotic systems*. 2017. No. 22. Article No. 8 (in Russian).
8. Gudkovskikh M.V. Methodology for comprehensive assessment of tourism potential // *Geographical bulletin*. 2017. No. 1 (40). P. 102–116 (in Russian). doi: 10.17072/2079-7877-2017-1-102-116
9. Vilfand R.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu., Zviagintsev A.M., Nakhayev M.I., Zakharova P.V., Lapchenko V.A. Air quality monitoring and prognosis in Moscow region // *Biosphere*. 2014. V. 6. No. 4. P. 339–351 (in Russian).
10. Sedykh V.A., Kurolap S.A., Belyaeva L.N., Mazurov G.I., Kozlov A.T., Zakusilov V.P. Formaldehyde air pollution and risk assessment of carcinogenic effects // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 2. P. 73–79 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-073-079
11. Melnikov P.A., Gusev D.M., Selezneva K.V., Shashenko V.A. Features of atmospheric air monitoring in large cities with developed industry // *Ecology and Industry of Russia*. 2024. V. 28. No. 2. P. 32–37 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2024-2-32-37
12. Autonomous non-profit organization Research Center for Robotics "Airalab Rus" [Internet resource] <https://airalab.org/ru/air-monitoring> (Accessed: 15.05.2023).
13. Makarova N.M., Balashov A.L., Toygildin A.M., Svirsky A.G. Features of creating systems for automatic monitoring of pollutants from stationary sources of emission // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 4. P. 35–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-035-043
14. Zamai S.S., Yakubailik O.E. Models for assessing and forecasting atmospheric pollution by industrial emissions in the information and analytical system of environmental services of a large city. Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy gosudarstvennyy universitet, 1998. 109 p. (in Russian).
15. Krupnova T.G., Bulanova A.V., Makarovskikh T.A., Herreinstein A.V. Urban air pollution modeling: a critical review // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 27–33. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-027-033
16. Zaripov Sh.Kh., Mardanov R.F., Sharafutdinov V.F., Gilfanov A.K., Nikonenkova T.V. Mathematical models of pollution transfer in the environment. Kazan: Kazanskiy universitet, 2018. 47 p. (in Russian).
17. Kovtun V.N., Bolotin A.V. Dynamic behavior of Ni–H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> system at high anodic potentials and different electrolysis conditions // *Electrochemistry*. 2005. V. 41. No. 1. P. 111–115 (in Russian).
18. Bykov V.I., Tsybenova S.B. Nonlinear models of chemical kinetics. Moskva: URSS: KRASAND, 2011. 396 p. (in Russian).
19. Ecological atlas of Togliatti urban district: Unified municipal information system of Togliatti urban district [Internet resource] <http://emgis.ru/atlas/mel.aspx> (Accessed: 06.05.2024).