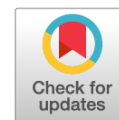


DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco456406>

# Оценка качества атмосферного воздуха в разных странах (обзор)

М.В. Поздняков<sup>1, 2</sup>, С.И. Мазилев<sup>1</sup>, С.В. Райкова<sup>1, 2</sup>, Ю.С. Гусев<sup>1</sup>,  
Н.Е. Комлева<sup>1, 2</sup>, А.Н. Микеров<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский медицинский научный центр гигиены Федерального научного центра медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Саратов, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

На основании данных научной литературы, нормативно-методических документов обобщён мировой опыт в области оценки качества атмосферного воздуха в разных странах. Приведены особенности нормирования содержания поллютантов в атмосферном воздухе в ряде стран, включая Россию, и сравнение норм, установленных в этих государствах. Выявлены различные подходы к нормированию содержания поллютантов в атмосферном воздухе в разных странах. Проанализированы методы оценки качества воздуха и инструментального контроля в разных странах, рассмотрены наиболее известные и популярные математические модели оценки и прогнозирования качества атмосферного воздуха. Выявлено, что данные о состоянии атмосферного воздуха, полученные с помощью прогностического моделирования, имеют значительное сходство с данными, полученными на основе натуральных измерений, однако использование широкой сети станций измерения позволяет получить наиболее точные данные о концентрации загрязнителей атмосферного воздуха в текущий период времени. Приведён обзор мировых онлайн-сервисов мониторинга состояния атмосферного воздуха в реальном времени. Описаны методики оценки риска влияния концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на здоровье населения.

Установлено, что наибольшие успехи в области контроля качества атмосферного воздуха достигнуты в странах Европы, США, Китае, жители которых могут получать актуальную информацию о состоянии атмосферного воздуха в свободном доступе в режиме реального времени. В России, несмотря на проводимую оценку качества атмосферного воздуха, до настоящего времени не существует доступного для населения единого сервиса, позволяющего получить всю необходимую информацию о качестве атмосферного воздуха.

**Ключевые слова:** оценка качества атмосферного воздуха; поллютанты; нормирование; онлайн-сервисы мониторинга; риски; здоровье.

## Как цитировать:

Поздняков М.В., Мазилев С.И., Райкова С.В., Гусев Ю.С., Комлева Н.Е., Микеров А.Н. Оценка качества атмосферного воздуха в разных странах (обзор) // Экология человека. 2023. Т. 30, № 5. С. 325–339. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco456406>

Рукопись получена: 23.05.2023

Рукопись одобрена: 26.06.2023

Опубликована online: 05.09.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco456406>

# A review of international experience in air quality assessment

Michail V. Pozdnyakov<sup>1,2</sup>, Svyatoslav I. Mazilov<sup>1</sup>, Svetlana V. Raikova<sup>1,2</sup>,  
Yury S. Gusev<sup>1</sup>, Natalia E. Komleva<sup>1,2</sup>, Anatoly N. Mikerov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Saratov, Russian Federation;

<sup>2</sup> Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky, Saratov, Russian Federation

## ABSTRACT

This article provides a comprehensive overview of global practices in assessing atmospheric air quality in different countries. The review is based on scientific literature, regulatory frameworks, and methodological documents. It delves into the specificities of pollutant regulation in various countries, including Russia, and compares the standards established in each. Substantial differences in the approaches to the regulation of pollutants in the atmospheric have been identified between the countries.

Furthermore, this study examines the methods for assessing air quality and instrumental control. It explores renowned mathematical models used for evaluating and predicting atmospheric air quality. Notably, the findings reveal striking similarities between data obtained through predictive modeling and field measurements. However, the utilization of an extensive network of measurement stations enables the acquisition of the most precise and up-to-date information on atmospheric pollutant concentrations.

Moreover, this article offers an overview of online services available globally for real-time monitoring of atmospheric air quality. These platforms play a crucial role in providing immediate insights into the state of the air we breathe. Additionally, the article presents the methods employed for assessing the health risks associated with atmospheric pollutant levels and their impact on the population health.

It has been established that the countries of Europe, the USA, and China have achieved significant success in the field of atmospheric air quality control. Residents in these countries have access to up-to-date information about the state of atmospheric air in real-time. However, in Russia, despite ongoing assessments of air quality, there is currently no public service available that provides comprehensive information on atmospheric air quality.

**Keywords:** ambient air quality estimation; air pollutants; regulation; online monitoring services; risks; health.

## To cite this article:

Pozdnyakov MV, Mazilov SI, Raikova SV, Gusev YuS, Komleva NE, Mikerov AN. A review of international experience in air quality assessment. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2023;30(5):325–339. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco456406>

## ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение атмосферного воздуха признаётся ВОЗ одной из самых серьёзных экологических угроз [1]. Развитие промышленного комплекса, рост индустриализации приводят к увеличению выбросов в атмосферу. Аэрополлютанты оказывают ряд негативных эффектов на здоровье человека, приводя к формированию и прогрессированию заболеваний сердечно-сосудистой, дыхательной, эндокринной систем, аллергических реакций, онкопатологии и др. [2]. Детское население, лица с хроническими заболеваниями являются наиболее уязвимыми к негативному воздействию загрязнителей атмосферного воздуха [3]. В связи с вышесказанным постоянный контроль за качеством атмосферного воздуха является важнейшей задачей на государственном и общемировом уровнях.

В обзоре представлен мировой опыт нормирования аэрополлютантов, оценки качества атмосферного воздуха, охарактеризованы существующие онлайн-сервисы мониторинга состояния атмосферного воздуха, методики расчёта риска влияния загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения в разных странах.

## НОРМИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В РАЗНЫХ СТРАНАХ

Нормирование содержания загрязнителей атмосферного воздуха в представленных в обзоре странах осуществляется на государственном уровне. Для загрязнителей атмосферного воздуха с учётом класса опасности установлены

предельно допустимые концентрации (ПДК). Нормирование содержания загрязняющих веществ проводится путём определения значения максимально-разовых, среднесуточных и среднегодовых концентраций. Каждое государство самостоятельно устанавливает ПДК аэрополлютантов, однако существуют «Глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твёрдых частиц (PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>), озона, двуокиси азота, двуокиси серы и окиси углерода» [4]. Данные рекомендации основаны на экспертной оценке актуальных научных данных об их влиянии на здоровье человека и применимы в любой стране мира (табл. 1).

В документе ВОЗ [4] также представлены рекомендации качественного характера о содержании в воздухе сажи/атомарного углерода, сверхтонких взвешенных частиц (диаметром ≤1 мкм) и частиц, попадающих в воздух в результате пыльных и песчаных бурь.

Помимо различных значений ПДК аэрополлютантов атмосферного воздуха в разных государствах используются разные временные периоды нормирования загрязнителей и единицы измерения их концентрации. Например, в США для измерения содержания CO, O<sub>3</sub> используют ppm (“particles per million”, частиц на миллион), для NO<sub>2</sub> — ppb (“particles per billion”, частиц на миллиард), а в странах Европы и Китае для CO — мг/м<sup>3</sup>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> — мкг/м<sup>3</sup>. Для удобства сравнения в табл. 2 все величины приведены в соответствие с принятыми в России единицами мг/м<sup>3</sup>, для чего были использованы коэффициенты, связывающие молекулярную массу вещества, концентрацию в ppm, ppb и объёмную концентрацию [5].

В России ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе регламентируются санитарными правилами и нормами<sup>1</sup>. В данном документе приводятся ПДК около

**Таблица 1.** Предельно допустимая концентрация загрязнителей воздуха, рекомендованная ВОЗ [4]

**Table 1.** WHO maximum permissible concentration of air pollutants [4]

Загрязнитель Pollutant	Среднегодовое значение, мкг/м <sup>3</sup> Average annual concentration, µg/m <sup>3</sup>	Среднесуточное значение, мкг/м <sup>3</sup> Average daily concentration, µg/m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	—	40
CO	—	4000
NO <sub>2</sub>	10	25
O <sub>3</sub>	60*	100**
PM <sub>2,5</sub>	5	15
PM <sub>10</sub>	15	45

\* суточная 8-часовая средняя концентрация, пиковый сезон. Пиковая сезонная концентрация рассчитывается как среднесуточная 8-часовая концентрация O<sub>3</sub> в течение шести идущих подряд месяцев с наибольшим средним шестимесячным значением концентрации O<sub>3</sub>.

\*\* суточная 8-часовая максимальная концентрация, рассчитывается как 99-й перцентиль (т.е. 3–4 дня превышения фонового уровня в год).

\* daily 8-hour average concentration, peak season. Peak seasonal concentration is calculated as the daily average 8-hour O<sub>3</sub> concentration for six consecutive months with the highest average six-month O<sub>3</sub> concentration.

\*\* daily 8-hour maximum concentration, calculated as the 99<sup>th</sup> percentile (i.e. 3–4 days above the background level per year).

<sup>1</sup> СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Дата обращения: 05.05.2023. Доступ по ссылке: [https://www.rosпотребнадzor.ru/files/news/GN\\_sreda%20\\_obitaniya\\_compressed.pdf](https://www.rosпотребнадzor.ru/files/news/GN_sreda%20_obitaniya_compressed.pdf)

**Таблица 2.** Предельно допустимые концентрации загрязнителей в различных странах, мг/м<sup>3</sup>**Table 2.** Maximum permissible concentration of pollutants in different countries (mg/m<sup>3</sup>)

Страна Country	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	Pb	Взвешенные частицы Particulate matter	
						PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Россия   Russia	0,05/0,5	0,04/0,1	0,03/0,1	3,0/3,0	0,00015/0,0003	0,025/0,035	0,04/0,06
США   USA	–/1,33	0,10/0,19	–/0,14	–/10,45	0,00015/–	0,012/0,035	–/0,15
ЕС   EU	–/0,125	0,04/0,2	–/0,12	–/10	0,0005/–	0,02/–	0,04/0,05
Китай   China	0,02/0,05	0,04/0,08	–/0,1	4/10	0,0005/–	0,015/0,035	0,04/0,05

Примечание: в числителе — среднегодовые, в знаменателе — среднесуточные значения.  
Note: in the numerator — the average annual, in the denominator — the average daily values.

1700 загрязняющих веществ, которые содержатся в атмосферном воздухе, в том числе указанных в табл. 2. Документ устанавливает также ПДК микроорганизмов-продуцентов, бактериальных препаратов и их компонентов в атмосферном воздухе, ориентировочные безопасные уровни и аварийные пределы воздействия отравляющих веществ и продуктов их деструкции в атмосферном воздухе.

В США стандарты качества атмосферного воздуха установлены в соответствии с действующим законом «О чистом воздухе», согласно которому Агентство по защите окружающей среды (United States Environmental Protection Agency, EPA) проводит нормирование шести основных загрязнителей [6]. Закон «О чистом воздухе» определяет два типа национальных стандартов качества атмосферного воздуха. Первичные стандарты обеспечивают охрану общественного здоровья, в том числе защиту наиболее чувствительных групп населения: лиц, страдающих астмой; детей и лиц пожилого возраста. Вторичные стандарты обеспечивают защиту общественного благосостояния, включая защиту от ухудшения видимости и повреждения животных, сельскохозяйственных культур, растительности и зданий.

В Европейском Союзе требования к качеству атмосферного воздуха регламентируются Европейским агентством по окружающей среде (European Environment Agency, EEA). Помимо шести загрязнителей, нормируемых EPA, европейскими стандартами определяются ПДК для бензола, мышьяка, кадмия, никеля, полициклических ароматических углеводородов [7, 8].

В последние 10 лет существенное внимание состоянию атмосферного воздуха уделяется в Китае [9], где оценка качества атмосферного воздуха осуществляется в соответствии со стандартом GB 3095—2012<sup>1</sup>, в котором основными загрязнителями признаны SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>. Существуют также дополнительные

стандарты, устанавливающие ПДК для бенз[а]пирена, свинца, оксидов азота, общего количества взвешенных частиц.

Таким образом, в разных странах используют различные подходы к нормированию содержания загрязнителей в атмосферном воздухе.

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

### Методы оценки

Оценка качества атмосферного воздуха проводится как по данным инструментальных замеров с помощью стационарных, маршрутных и передвижных постов наблюдения, так и по расчётным данным с использованием современных компьютерных моделей [10].

Для определения концентрации взвешенных частиц используют датчики (дешевы в производстве, имеют низкое энергопотребление и быстрое время отклика [11]), в основе работы которых лежит метод рассеяния света [12]. В этом методе источник света освещает частицы, а затем с помощью фотометра измеряется рассеянный свет от них. Для частиц диаметром более ~0,3 мкм количество рассеянного света примерно пропорционально их массовой/численной концентрации, однако частицы диаметром менее ~0,3 мкм не рассеивают достаточно света и не могут быть обнаружены этим методом [13, 14]. Обнаруживаемые частицы (диаметром более 0,3 мкм) можно разделить по размеру с помощью алгоритма на основе сигнала, полученного от рассеянного света [15], либо путём прикрепления импактора/фильтра на входе [16].

Для измерения газообразных загрязнителей воздуха в настоящее время применяют два типа датчиков: металл-оксид-полупроводник (МОП) и электрохимические. В датчиках типа МОП используется оксид металла, который меняет свои электрические свойства (чаще сопротивление) при воздействии целевого газа. Это изменение легко измерить, и оно соответствует концентрации газа [17]. Такие датчики имеют небольшие размеры (несколько

<sup>1</sup> Ambient air quality standards GB 3095—2012. Дата обращения: 05.05.2023.

Доступ по ссылке: <http://faolex.fao.org/docs/pdf/chn136756.pdf>

миллиметров), весят несколько граммов, недорогие (~10 долларов США), имеют быстрое время отклика, низкие пределы обнаружения и потребляемую мощность (~100 мВт) [18, 19]. К недостаткам датчиков типа МОП можно отнести высокую чувствительность к изменениям условий окружающей среды и мешающим газам, также многие датчики имеют нелинейную кривую отклика [20, 21]. В электрохимическом датчике целевой газ подвергается электролизу (окислению или восстановлению) на рабочем электроде и генерирует электрический ток, который уравнивается реакцией на противоэлектроде. Измеренный электрический ток соответствует концентрации газа, а отклик — линейный либо логарифмический [18]. Утверждается, что электрохимические датчики имеют более низкие пределы обнаружения, требования к мощности (~100 мкВт) и чувствительность к изменениям условий окружающей среды и мешающим газам, чем датчики типа МОП, но для них характерен больший размер (несколько десятков миллиметров) и более высокая цена (~100 долларов США) [18, 19].

В обзоре [22] описаны 112 моделей станций мониторинга качества воздуха от 77 производителей. По данным ВОЗ, стационарные наблюдательные посты установлены в 6000 городов 117 стран мира [23]. В рамках проекта World Air Quality Index публикуются данные от 12 000 станций мониторинга, в том числе персональных, а общее их количество — более 30 000 [24].

Кроме наземных станций слежения, в настоящее время используют также спутниковые системы дистанционного зондирования, которые измеряют оптическую толщину аэрозоля (Aerosol Optical Thickness, AOT, или Aerosol Optical Depth, AOD), для чего применяют спектрометрические технологии (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) [25]. Продукты MODIS-AOD эффективно используются для прогнозирования краткосрочных концентраций  $PM_{2.5}$  в Китае [26, 27], а также при создании карт [28]. Недостатком таких систем является тот факт, что облачный покров серьезно ограничивает фактический пространственный охват AOD [29]. Спутниковые данные актуальны по времени только для момента прохождения спутника, интегральны по всему атмосферному столбу.

Для повышения точности и надёжности спутниковые данные объединяют с наземными или воздушными. За последние 20 лет во многих странах (США, Китае, России и др.) [30] развёрнуты разные полевые кампании распределённых региональных сетей наблюдений за аэрозолями (Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Networks, DRAGON) [31, 32].

## Опыт России

В Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Экология» с 2018 года действует Федеральный проект «Чистый воздух». Он направлен на снижение выбросов опасных загрязняющих

веществ, оказывающих наибольшее негативное влияние на окружающую среду и здоровье населения [33]. Данные от автоматических станций контроля загрязнения атмосферного воздуха поступают в режиме реального времени в Центр сбора данных Росгидромета на базе ФГБУ «НПО Тайфун». Станции контроля расположены в 12 городах на территории 9 управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: Братск, Красноярск, Липецк, Магнитогорск, Медногорск, Нижний Тагил, Новокузнецк, Норильск, Омск, Челябинск, Череповец и Чита [34]. Вся официальная информация и новости проекта публикуются на официальном сайте<sup>2</sup>, а также в социальных сетях и мессенджерах.

На сайте Росгидромета также имеется ограниченная информация о проекте «Чистый воздух». При этом существует как официальный сайт Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — УГМС (Росгидромета)<sup>3</sup>, так и сайты управлений отдельных регионов или федеральных округов [35]. К примеру, на сайте «Приволжского УГМС»<sup>4</sup> описывается реализация проекта «Чистый воздух» в г. Медногорске Оренбургской области. Сайты различных УГМС не имеют единообразного оформления и структуры, в то же время практически на всех присутствует раздел «Мониторинг загрязнения окружающей среды», в котором представлены интерактивные карты мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. Данные карты отображают либо только места расположения стационарных постов наблюдения, либо концентрацию загрязняющих веществ в ПДК в местах наблюдения. Можно также найти информацию о загрязняющих веществах, определяемых отдельными постами наблюдения. Однако полная информация о качестве атмосферного воздуха в режиме реального времени, а также прогностические данные о загрязнении воздуха на территории соответствующего УГМС в свободном доступе отсутствуют. Таким образом, несмотря на проводимый контроль за состоянием атмосферного воздуха, в России не существует единой системы для визуализации данной информации в удобном виде.

## Опыт США

По данным EPA, на территории США функционируют около 4000 станций мониторинга, принадлежащих в основном государственному природоохранному органам и эксплуатируемых ими, которые предоставляют ежедневные или ежечасные результаты измерения концентраций загрязняющих веществ в базу данных AQS (Air Quality System) [36].

<sup>2</sup> Федеральный проект «Чистый воздух» национального проекта «Экология». Официальный сайт. Дата обращения: 05.05.2023. Доступ по ссылке: <http://min.prirodyair.tilda.ws>

<sup>3</sup> Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Официальный сайт. Дата обращения: 05.05.2023. Доступ по ссылке: <https://www.meteorf.gov.ru/>

<sup>4</sup> ФГБУ «Приволжское УГМС». Официальный сайт. Дата обращения: 05.05.2023. Доступ по ссылке: <http://www.pogoda-sv.ru>

Для мониторинга содержания в атмосферном воздухе  $PM_{2.5}$  как наиболее приоритетного загрязнителя применяется компьютерная модель Community Multiscale Air Quality model (CMAQ) [37] с использованием 13 вертикальных слоёв, которые охватывают верхнюю часть тропосферы над территорией США. В качестве выходных данных CMAQ о среднесуточной концентрации  $PM_{2.5}$  используются почасовые выходные данные приземного слоя (около 19 м от земли). Помимо  $PM_{2.5}$  модели CMAQ прогнозируют также концентрации в атмосферном воздухе озона, токсичных и кислотообразующих веществ. Данные CMAQ используются проектом EQUATES (EPA's Air QUALity Time Series Project) для поддержки нормативно-правового и политического анализа, а также исследований в области здравоохранения и экологии. Доступ к ресурсу предоставляется по запросу<sup>5</sup>.

### Опыт европейских стран

European Environment Agency, осуществляющее контроль качества атмосферного воздуха на территории Европейского союза, регулируется Управляющим советом, состоящим из представителей правительств 33 государств (стран ЕС, Исландии, Лихтенштейна, Норвегии, Турции и Швейцарии), представителя Европейской комиссии и двух учёных, назначенных Европейским парламентом. Агентство образовано в 1990 году, штаб-квартира находится в Копенгагене (Дания). Европейское агентство ЕЕА тесно сотрудничает с американским EPA [38].

Помимо общеевропейской существуют национальные организации, такие как Федеральное агентство по окружающей среде Германии (Umweltbundesamt, UBA)<sup>6</sup>, которые также могут использовать инфраструктуру EPA. Так, например, в работе [39] проанализированы данные долгосрочных наблюдений за изменчивостью твёрдых частиц ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ), газообразных загрязнителей ( $CO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  и  $O_3$ ) и метеорологических факторов на 412 стационарных станциях мониторинга с января 2008 по декабрь 2018 года на территории Германии. Исследователями выявлены значительные корреляционные связи концентрации  $CO$  и температуры с концентрацией  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$ , при этом обнаруженная слабая корреляция между концентрациями самих  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  позволила авторам сделать вывод о том, что у них разные источники.

В Великобритании основной сетью, осуществляющей контроль качества атмосферного воздуха, является Государственная автоматическая городская и сельская сеть AURN (Automatic Urban and Rural Network) [40], при этом в крупных городах есть и собственные независимые станции. Так, например, городской совет Бристоля содержит

пять дополнительных станций мониторинга, которые работают по тем же принципам, что и национальная сеть AURN [40].

В Европе реализуются также наднациональные проекты, направленные на повышение вовлечённости населения в решение проблем загрязнения атмосферного воздуха. Например, шесть европейских городов/регионов объединены в экологическую игру проекта Clair City Skylines<sup>7</sup> (Бристоль, Великобритания; Амстердам, Нидерланды; Сосновец, Польша; Любляна, Словения; Авейру, Португалия; Лигурия, Италия) [41].

### Опыт Индии

Экономическая и экологическая политика Индии не предусматривает повсеместного использования большого количества наземных станций мониторинга. Предпочтение отдаётся компьютерному моделированию на основе точечных натуральных данных о состоянии атмосферного воздуха с использованием пространственной интерполяции. Наиболее плотная сеть мониторинга находится в наибольшем по численности населения городе Мумбаи [42]. Каждая станция мониторинга предоставляет информацию о качестве воздуха в определённом месте, в то время как для общего контроля качества воздуха необходимы пространственные вариации. Данные мониторинга качества воздуха пространственно интерполируются с использованием методов ArcGIS: взвешивание по обратному расстоянию (IDW), кригинг (сферический и гауссовский) и сплайновые методы. В работе [42] интерполированные результаты по концентрации загрязнителей воздуха сравнивались с натурными данными в том же регионе. Сравнение результатов показало хорошее совпадение значений, рассчитанных с помощью IDW и кригинга, с данными наблюдений.

### Опыт Китая

В Китае мониторинг качества окружающей среды осуществляется с начала 1970-х годов и продолжает активно развиваться [43]. В настоящее время в этой стране существует четырёхуровневая система контроля качества атмосферного воздуха, которая включает в себя станции мониторинга на национальном, провинциальном, муниципальном и уездном уровнях. На национальном уровне China National Environmental Monitoring Center (CNEMC) является центром технологий, сетей, информации, контроля качества и обучения в отношении мониторинга качества окружающей среды. Собираемые CNEMC данные обеспечивают качественную оценку состояния атмосферного воздуха в стране. В 2012 году была завершена работа по настройке Национальной сети мониторинга качества атмосферного воздуха, состоящей из 1436 пунктов наблюдения, которая охватила 338 городов уровня

<sup>5</sup> Данные компьютерной модели Community Multiscale Air Quality model (CMAQ). Дата обращения: 02.04.2023. Доступ по ссылке: [https://www.epa.gov/cmaq/forms/cmaq-data#download\\_CMAQ\\_data](https://www.epa.gov/cmaq/forms/cmaq-data#download_CMAQ_data)

<sup>6</sup> Федеральное агентство по окружающей среде Германии Umweltbundesamt. Официальный сайт. Дата обращения: 02.05.2023. Доступ по ссылке: <https://www.umweltbundesamt.de/en/>

<sup>7</sup> Проект Clair City Skylines. Дата обращения: 02.04.2023. Доступ по ссылке: <http://www.claircity.eu/2020/02/06/claircity-skylines/>

префектуры или выше в 31 провинции. Кроме того, в провинциях, автономных районах и муниципалитетах центрального подчинения создано более 4000 провинциальных и городских контрольных пунктов. Таким образом, Китай построил крупнейшую сеть мониторинга качества воздуха в городской среде среди всех развивающихся стран. К концу 2012 года 74 города-первопроходца регулярно проводили мониторинг шести загрязнителей воздуха (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и CO), а с начала 2015 года мониторинг шести вышеуказанных загрязнителей воздуха проводится во всех 338 городах сети [43]. С 2015 года в 20 городах провинции Сычуань начался мониторинг в режиме реального времени шести стандартных загрязнителей атмосферы (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и CO) с почасовой публикацией данных Министерством охраны окружающей среды КНР [44].

Однако, несмотря на обширную сеть станций мониторинга качества воздуха, в Китае также используются системы моделирования. В настоящее время типовые модели качества воздуха можно разделить на регулируемые модели малого и среднего масштаба (ISC3, AERMOD, ADMS, CALPUFF), комплексные модели регионального масштаба (NAQPMS, CAMX, WRF-CHEM, CMAQ) и модели глобального масштаба (MOZART, GEOS-Chem). Согласно другой классификации, модели делятся на модели рассеивания, фотохимические и модели рецепторов [45].

**Таблица 3.** Онлайн-сервисы мониторинга состояния атмосферного воздуха

**Table 3.** Air condition monitoring online services

Название, сайт Name, site	Страна Country	Загрязнители   Pollutants		Особенности Features
		физические physical	химические chemical	
BreezoMeter <a href="https://www.breezometer.com">https://www.breezometer.com</a>	Израиль Israel	PM <sub>2.5</sub> PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> NO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO	Используется комбинация данных от спутников и наземных станций. Приложение для смартфона отображает качество воздуха в режиме реального времени с точностью до 5 м Uses a combination of data from satellites and ground stations Smartphone app to display air quality in real time with an accuracy of up to 5 m
CityAir <a href="https://cityair.ru/ru/">https://cityair.ru/ru/</a> AirVoice <a href="https://airvoice.io/ru">https://airvoice.io/ru</a>	Россия Russia	PM <sub>2.5</sub> PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO H <sub>2</sub> S	В основе моделирования лежат прогноз поля скоростей ветра (GFS, WRF) и данные об основных источниках эмиссий. Охватывает очень мало городов The modeling is based on the wind velocity field forecast (GFS, WRF) and data on the main sources of emissions. Covers very few cities
IQAir Map <a href="https://www.iqair.com">https://www.iqair.com</a>	Швейцария Switzerland	PM <sub>2.5</sub>	Набор веществ различается для разных точек	Использует спутниковые данные по PM <sub>2.5</sub> , данные наземных станций по другим загрязнителям. Охватывает малоразвитые и неблагоприятные зоны Uses satellite data for PM <sub>2.5</sub> , ground station data for other pollutants. Covers underdeveloped and unfavorable areas

<sup>9</sup> Федеральная геоинформационная система «Воздух». Дата обращения: 02.04.2023. Доступ по ссылке: <https://air-rf-dev.rusgis.com>

## ИНТЕРАКТИВНЫЕ КАРТЫ

В России в 1995 году образована межрегиональная общественная организация содействия развитию рынка геоинформационных технологий и услуг (ГИС-Ассоциация). Являясь негосударственной и некоммерческой общественной организацией, ГИС-Ассоциация объединила в своих рядах специалистов высших учебных заведений, научно-исследовательских, производственных, инженерных, проектно-конструкторских, информационных и других организаций, занятых в области разработки и применения геоинформационных технологий на территории бывшего СССР [46].

Геоинформационный сервис экологического мониторинга окружающей среды и метеорологических данных «Воздух» создан компанией ООО «РусГИС Технологии» (дочерним предприятием ПАО «Ростелеком») <sup>9</sup>. Доступ к его функционалу имеют только зарегистрированные пользователи. В открытых источниках актуальная информация о метеорологических данных сервиса «Воздух» отсутствует.

В мировой практике разработано и функционирует множество онлайн-сервисов для получения актуальной информации о состоянии воздуха в любой точке мира. Наиболее популярные онлайн-сервисы мониторинга состояния атмосферного воздуха приведены в табл. 3.

Окончание табл. 3 | End of the Table 3

Название, сайт Name, site	Страна Country	Загрязнители   Pollutants		Особенности Features
		физические physical	химические chemical	
Национальная гидрометеорологическая служба Республики Казахстан, National Hydrometeorological Service of the Republic of Kazakhstan <a href="https://kazhydromet.kz/ru/post/19">https://kazhydromet.kz/ru/post/19</a> <a href="http://maps.hydromet.kz">http://maps.hydromet.kz</a> <a href="http://apps.kazhydromet.kz:3838/app_dem_visual/">http://apps.kazhydromet.kz:3838/app_dem_visual/</a>	Казахстан Kazakhstan	PM <sub>2,5</sub> PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub> NO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO	Охватывает 45 населенных пунктов Казахстана. Информация обновляется с интервалом в один час (по 84 автоматическим станциям) и три раза в сутки по 56 ручным постам. Частые сбои Covers 45 settlements of Kazakhstan. The information is updated with an interval of one hour (for 84 automatic stations) and three times a day for 56 manual posts. Frequent failures
Nebo.live <a href="https://nebo.live">https://nebo.live</a>	Россия Russia	PM <sub>2,5</sub> PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO	Открытая платформа для создания независимой системы измерения качества воздуха. Использует только данные наземных станций, подключённых к проекту An open platform for building an independent air quality measurement system. Uses only data from ground stations connected to the project
OpenAQ <a href="https://openaq.org/#/map">https://openaq.org/#/map</a>	США, Монголия USA, Mongolia	PM <sub>2,5</sub> PM <sub>10</sub> BC	NO <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO	Проект с открытым исходным кодом. Использует открытые данные наземных станций Open source project. Uses open data from ground stations
PlumeLabs <a href="https://air.plumelabs.com/air-quality-map">https://air.plumelabs.com/air-quality-map</a>	Франция France	PM <sub>2,5</sub> PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Карта загрязнённости воздуха в реальном времени для каждой улицы более 100 крупнейших городов Европы и США Real-time air pollution map for every street in over 100 major cities in Europe and the USA
SILAM <a href="https://silam.fmi.fi">https://silam.fmi.fi</a>	Финляндия Finland	PM <sub>2,5</sub> PM <sub>10</sub> Dust SOA SIA	NO <sub>2</sub> NO O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO	Комплексная модель состава атмосферы от глобального до среднего масштаба. Основана на моделях Эйлера–Лагранжа Global-to-meso-scale dispersion model developed for atmospheric composition, incorporates both Eulerian and Lagrangian transport routines
VentySky <a href="https://www.ventusky.com">https://www.ventusky.com</a>	Чехия Czech	PM <sub>2,5</sub> PM <sub>10</sub> Dust	NO <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO	Погодный сервис реального времени, отображает также аэрополлютанты. Использует комбинацию данных от спутников и наземных станций, модели SILAM, FMI Real-time weather service, also displays air pollutants. Uses a combination of data from satellites and ground stations, SILAM, FMI models
Windy <a href="https://www.windy.com">https://www.windy.com</a>	Чехия Czech	PM <sub>2,5</sub> SOA SIA	NO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Погодный сервис реального времени, отображает также аэрополлютанты. Использует модели GFS, ECMWF и ICON Real-time weather service, also displays air pollutants. Uses GFS, ECMWF and ICON models
World's air pollution <a href="https://waqi.info">https://waqi.info</a> <a href="https://aqicn.org">https://aqicn.org</a>	Китай China	PM <sub>2,5</sub> PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> CO	В режиме реального времени отображает данные более 30 000 станций в 2000 городах по всему миру Displays real-time data from over 30,000 stations in 2,000 cities worldwide

Примечание: BC — углеродные частицы, Dust — пыль, SOA — вторичные органические аэрозоли, SIA — вторичные неорганические аэрозоли.

Note: BC — black carbon, Dust — dust, SOA — secondary organic aerosols, SIA — secondary inorganic aerosols.



## ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Для прогнозирования качества атмосферного воздуха используются различные подходы и модели. Существует три основных вида моделей для прогнозирования загрязнения воздуха: статистические, интеллектуальные и гибридные [47]. Статистические модели в основном учитывают статистическую взаимосвязь между концентрацией загрязнителей воздуха и историческими данными о различных влияющих факторах и устанавливаются с использованием математико-статистических методов. Среди многочисленных статистических моделей для оценки качества атмосферного воздуха наиболее широко используются модели временных рядов и регрессионные модели. Модели временных рядов включают авторегрессионную модель, модель скользящего среднего, авторегрессионную модель скользящего среднего и интегральную авторегрессионную модель скользящего среднего. Регрессионные модели, применяемые для прогнозирования загрязнения воздуха, включают модель пошаговой регрессии, модель регрессии главных компонент, модель множественной линейной регрессии и др.

Интеллектуальные модели учитывают источники загрязнения (например, промышленные предприятия, транспорт, техногенные аварии, природные источники, такие как лесные пожары и т.д.). В настоящее время для изучения воздействия лесных пожаров, природных и техногенных катастроф, извержений вулканов на состояние атмосферного воздуха применяется пакет компьютерных программ SILAM, созданный Финским метеорологическим институтом [48]. В качестве исходных данных система использует архивные метеорологические базы данных с применением модели Эйлера–Лагранжа для построения расчётной схемы. В настоящее время система SILAM широко применяется для моделирования распространения в атмосфере газовых примесей, пыли, радиоактивных изотопов, взвешенных частиц различного диаметра и природных аллергенов [48].

Предложены также модели для прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха, создаваемого автотранспортом в городской среде с учётом застройки [49].

В то время как прогноз модели качества воздуха предоставляет некоторые концентрации, усреднённые по времени/пространству, наблюдение в любой момент времени в точке мониторинга отражает отдельное событие или конкретную реализацию из совокупности, которая почти всегда будет отличаться от оценки модели, даже если модель и её входные данные были идеальными [50, 51].

Сравнение смоделированных и наблюдаемых концентраций в пространстве и времени указывает на погрешности и ошибки при моделировании абсолютных уровней концентраций загрязняющих веществ на отдельных участках мониторинга [52].

Независимо от того, насколько точна региональная модель оценки качества воздуха, стохастические вариации в атмосфере не могут быть последовательно воспроизведены детерминированными численными моделями. В работе [51] показано, как количественно определить этот невоспроизводимый стохастический компонент, выделяя синоптическое воздействие, заложенное в более чем 30 лет исторических наблюдений, и оценивая эффективность 36-километровой полностью связанной модели WRF-CMAQ при моделировании концентраций озона за 21 год над прилегающей территорией. Проведённый с использованием натуральных данных из США анализ показал, что в среднем неустранимая ошибка, связанная со стохастическим характером атмосферы, колеблется от ~2 ppb в 50-м процентиле до ~5 ppb в 95-м процентиле [51].

Имеется опыт пространственного моделирования содержания  $PM_{10}$  в атмосферном воздухе с использованием данных наблюдений за 2012–2016 гг. в урбанизированном и густонаселённом штате Малайзии Селангоре на основании данных дистанционного зондирования, таких как высота над уровнем моря, уклон, плотность дороги, индекс растительности с поправкой на почву, нормализованный разностный индекс растительности, индекс застройки, температура поверхности земли и скорость ветра. Пространственное моделирование содержания  $PM_{10}$  в атмосферном воздухе было выполнено по данным, получаемым от четырёх наземных измерительных станций с использованием алгоритмов Naïve Bayes (NB), Random Forest (RF) и K-Nearest Neighbour (KNN). Точность моделирования оценена авторами как высокая (0,96; 0,98; 0,91 для каждого из методов соответственно) [53].

Несмотря на то, что данные о состоянии атмосферного воздуха, полученные с помощью прогностического моделирования, имеют значительное сходство с данными, полученными на основе натуральных измерений, использование широкой сети станций измерения позволяет получить наиболее точные данные о концентрации загрязнителей атмосферного воздуха в текущий период времени.

## ОЦЕНКИ РИСКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

Различными государствами и международными организациями предложены методики оценки риска влияния загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения. Рекомендуемая ВОЗ методика оценки риска для здоровья от загрязнения воздуха (Air Pollution Health Risk Assessment, AP-HRA) анализирует возможные последствия принимаемых политических мер, влияющих на качество воздуха в различных социально-экономических, экологических и политических условиях. AP-HRA является важным инструментом для обоснования принятия решений государственной политики в сфере

здоровьесбережения населения [54]. Методика предусматривает оценку экспозиции популяции к загрязнителям воздуха, оценку риска для здоровья, количественное выражение неопределённостей генерируемой оценки последствий для здоровья населения.

Методика AP-HRA предназначена для оценки рисков уровней выброса загрязняющих веществ в прошлом, настоящем и будущем на основе прогнозирования изменения уровней выбросов в результате принятых политических решений или других причин изменения качества воздуха [54]. Данная методика оценивает концентрации загрязняющих веществ в воздухе, экспозицию (общее время и количество контактов) исследуемой группы населения и потенциальные риски для здоровья лиц, подвергающихся воздействию загрязнителей атмосферного воздуха.

В России и странах СНГ разработаны собственные инструкции для оценки риска [55], основанные на методологии риск-анализа, созданной в Центре по безопасности химической промышленности (CCPS) США [56]. В соответствии с методологией устанавливаются постоянные источники выбросов вредных веществ в атмосферу с учётом их количества, физических и химических свойств. После определения популяции, которая подвергается экспозиции загрязняющими веществами от определённого источника, и процесса распространения поллютантов (главным образом путём использования математических моделей) проводится установление зависимостей «доза–эффект» с количественной характеристикой эффекта или риска [55].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загрязнение атмосферного воздуха остаётся одной из глобальных проблем человечества. Многими государствами реализуется комплекс мероприятий, направленных на усиление контроля за качеством атмосферного воздуха и снижением уровня загрязнения. На законодательном уровне устанавливаются предельно допустимые концентрации различных загрязнителей и время, за которое производится оценка. Увеличивается охват территории, точность оценки текущего и прогнозируемого загрязнения. Этому способствует развитие вычислительной техники, удешевление стоимости датчиков для измерения концентрации различных веществ, растущий запрос общества на качественную окружающую среду. Разработаны и внедрены онлайн-сервисы для наблюдения за качеством атмосферного воздуха. В то же время остаются проблемы в сфере контроля качества атмосферного воздуха, в частности неравные возможности у развитых и развивающихся стран, неравномерное покрытие территории сетью пунктов наблюдения за состоянием атмосферы.

Наибольшие успехи в сфере контроля качества атмосферного воздуха достигнуты в странах Европы, США, Китае, жители которых могут получать актуальную информацию о состоянии атмосферного воздуха в свободном доступе в режиме реального времени. В России, несмотря на проводимую оценку качества атмосферного воздуха, до настоящего времени не существует доступного для населения единого сервиса, позволяющего получить всю необходимую информацию о качестве атмосферного воздуха.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** М.В. Поздняков разработал концепцию и первоначальный дизайн исследования; М.В. Поздняков и С.И. Мазиллов работали над получением, анализом и интерпретацией первичных данных, подготовили первый вариант статьи; С.В. Райкова и Ю.С. Гусев принимали участие в получении и анализе дополнительных данных и анализе полученных результатов; М.В. Поздняков и С.И. Мазиллов выполнили интерпретацию всех собранных и обработанных данных, сформулировали выводы и подготовили окончательный вариант статьи; А.Н. Микеров и Н.Е. Комлева внесли существенный вклад в концепцию и дизайн исследования, редактирование статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

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

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** M.V. Pozdnyakov — concept and initial design of the study, M.V. Pozdnyakov and S.I. Mazilov worked on obtaining, analyzing and interpreting primary data, drafted the first version of the manuscript, S.V. Raikova and Yu.S. Gusev took part in obtaining and analyzing additional data and interpreted the results. M.V. Pozdnyakov and S.I. Mazilov performed the interpretation of all collected and processed data, formulated the conclusions and approved the final version of the article. A.N. Mikerov and N.E. Komleva made a significant contribution to the concept and design of the study and reviewing the article. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept of the study, took part in the research and writing of the article, read and approved the final version before publication).

**Funding source.** No external funding.

**Competing interests.** No competing interests.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.who.int/ru/> [Internet]. Всемирная организация здравоохранения. Загрязнение атмосферного воздуха. Информационный бюллетень ВОЗ [дата обращения: 31.03.2023]. Доступ по ссылке: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
2. Dominski F.H., Branco J.H., Buonanno G., et al. Effects of air pollution on health: a mapping review of systematic reviews and meta-analyses // *Environ Res.* 2021. Vol. 201. P. 111487. doi: 10.1016/j.envres.2021.111487
3. Чанчаева Е.А., Гвоздарева О.В., Гвоздарев А.Ю. Состояние атмосферного воздуха и здоровье детей в условиях возрастающей транспортной и теплоэнергетической нагрузки // *Экология человека.* 2019. Т. 26, № 11. С. 12–19. doi: 10.33396/1728-0869-2019-11-12-19
4. Всемирная организация здравоохранения. Глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц (ТЧ<sub>2,5</sub> и ТЧ<sub>10</sub>), озона, двуокси азота, двуокси серы и окиси углерода [интернет]. 2021. Дата обращения: 31.03.2023. Доступ по ссылке: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345334/9789240035409-rus.pdf>
5. Муравьева С.И., Буковский М.И., Прохорова Е.К., и др. Руководство по контролю вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Москва : Химия, 1991. 368 с.
6. <https://www.epa.gov/> [Internet]. United States Environmental Protection Agency. NAAQS Table [дата обращения: 04.04.2023]. Доступ по ссылке: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
7. <https://environment.ec.europa.eu/> [Internet]. European Commission. Environment [дата обращения: 31.03.2023]. Доступ по ссылке: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
8. <https://www.eea.europa.eu/> [Internet]. European Environment Agency. Air quality standards [дата обращения: 02.04.2023]. Доступ по ссылке: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards>
9. Wang Z., Tan Y., Guo M., et al. Prospect of China's ambient air quality standards // *J Environ Sci (China).* 2023. Vol. 123. P. 255–269. doi: 10.1016/j.jes.2022.03.036
10. Gong J., Ding L., Lu Y., et al. Scientometric and multidimensional contents analysis of PM<sub>2,5</sub> concentration prediction // *Heliyon.* 2023. Vol. 9, N 3. P. e14526. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14526
11. Wang Y., Li J., Jing H., et al. Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement // *Aerosol Science and Technology.* 2015. Vol. 49, N 11. P. 1063–1077. doi: 10.1080/02786826.2015.1100710
12. Rai A.C., Kumar P., Pilla F., et al. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring // *Sci Total Environ.* 2017. Vol. 607–608. P. 691–705. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266
13. Koehler K.A., Peters T.M. New methods for personal exposure monitoring for airborne particles // *Curr Environ Health Rep.* 2015. Vol. 2, N 4. P. 399–411. doi: 10.1007/s40572-015-0070-z
14. Thomas A., Gebhart J. Correlations between gravimetry and light scattering photometry for atmospheric aerosols // *Atmospheric Environment.* 1994. Vol. 28, N 5. P. 935–938. doi: 10.1016/1352-2310(94)90251-8
15. Northcross A.L., Edwards R.J., Johnson M.A., et al. A low-cost particle counter as a real-time fine-particle mass monitor // *Environ Sci Process Impacts.* 2013. Vol. 15, N 2. P. 433–439. doi: 10.1039/c2em30568b
16. Sousan S., Koehler K., Thomas G., et al. Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols // *Aerosol Sci Technol.* 2016. Vol. 50, N 5. P. 462–473. doi: 10.1080/02786826.2016.1162901
17. Fine G.F., Cavanagh L.M., Afonja A., Binions R. Metal oxide semiconductor gas sensors in environmental monitoring // *Sensors (Basel).* 2010. Vol. 10, N 6. P. 5469–5502. doi: 10.3390/s100605469
18. Aleixandre M., Gerboles M. Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas // *Chemical Engineering Transactions.* 2012. Vol. 30.
19. Piedrahita R., Xiang Y., Masson N., et al. The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring // *Atmospheric Measurement Techniques.* 2014. Vol. 7, N 10. P. 3325–3336. doi: 10.5194/amt-7-3325-2014
20. Stetter J.R., Li J. Amperometric gas sensors — a review // *Chem Rev.* 2008. Vol. 108, N 2. P. 352–366. doi: 10.1021/cr0681039
21. Spinelle L., Gerboles M., Aleixandre M., Bonavitacol F. Evaluation of metal oxides sensors for the monitoring of O<sub>3</sub> in ambient air at ppb level // *Chemical Engineering Transactions.* 2016. Vol. 54. P. 319–324.
22. Karagulian F., Barbieri M., Gerboles M., et al. Review of sensors for air quality monitoring. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2019.
23. Chloe C. Over 6,000 cities now monitor air quality, WHO reveals // *Air Quality News.* 2022. Режим доступа: <https://airqualitynews.com/2022/04/04/over-6000-cities-now-monitor-air-quality-who-reveals/> Дата обращения: 02.04.2023.
24. <https://aqicn.org/> [Internet]. World Air Quality Index. Worldwide Air Quality Monitoring Data Coverage [дата обращения: 02.04.2023]. Доступ по ссылке: <https://aqicn.org/sources/>
25. Lin C., Li Y., Yuan Z., et al. Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM<sub>2,5</sub> // *Remote Sensing of Environment.* 2015. Vol. 156. P. 117–128. doi: 10.1016/j.rse.2014.09.015
26. Hua Z., Sun W., Yang G., Du Q. A full-coverage daily average PM<sub>2,5</sub> retrieval method with two-stage IVW fused MODIS C6 AOD and two-stage GAM model // *Remote Sensing.* 2019. Vol. 11, N 13. P. 1558. doi: 10.3390/rs11131558
27. Zhao R., Gu X., Xue B., et al. Short period PM<sub>2,5</sub> prediction based on multivariate linear regression model // *PLoS One.* 2018. Vol. 13, N 7. P. e0201011. doi: 10.1371/journal.pone.0201011
28. Li T., Guo Y., Liu Y., et al. Estimating mortality burden attributable to short-term PM<sub>2,5</sub> exposure: a national observational study in China // *Environ Int.* 2019. Vol. 125. P. 245–251. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.073

29. Ford B., Heald C.L. Exploring the uncertainty associated with satellite-based estimates of premature mortality due to exposure to fine particulate matter // *Atmos Chem Phys*. 2016. Vol. 16, N 5. P. 3499–3523. doi: 10.5194/acp-16-3499-2016
30. van Donkelaar A., Martin R.V., Levy R.C., et al. Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events: a case study of the Moscow fires in 2010 // *Atmospheric Environment*. 2011. Vol. 45, N 34. P. 6225–6232. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.07.068
31. Holben B.N., Kim J., Sano I., et al. An overview of mesoscale aerosol processes, comparisons, and validation studies from DRAGON networks // *Atmos Chem Phys*. 2018. Vol. 18, N 2. P. 655–671. doi: 10.5194/acp-18-655-2018
32. Sorek-Hamer M., Chatfield R., Liu Y. Review: strategies for using satellite-based products in modeling PM<sub>2.5</sub> and short-term pollution episodes // *Environ Int*. 2020. Vol. 144. P. 106057. doi: 10.1016/j.envint.2020.106057
33. <https://ecologyofrussia.ru/> [интернет]. Федеральный проект «Чистый воздух» [дата обращения: 02.04.2023]. Доступ по ссылке: <https://ecologyofrussia.ru/proekt/chistyj-vozduh/>
34. <https://www.feerc.ru/> [интернет]. Федеральный проект «Чистый воздух». Национальный проект «Экология» [дата обращения: 02.04.2023]. Доступ по ссылке: <http://www.feerc.ru/uisem/portal/>
35. <https://www.meteorf.gov.ru/> [интернет]. Структура Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России [дата обращения: 03.05.2023]. Доступ по ссылке: <https://www.meteorf.gov.ru/about/structure/local/>
36. <https://www.epa.gov/> [Internet]. EPA AQS (Air Quality System) [дата обращения: 02.04.2023]. Доступ по ссылке: <https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data/air-data-basic-information>
37. Byun D., Schere K. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system // *Appl Mech Rev*. 2006. Vol. 59, N 2. P. 51–77. doi: 10.1115/1.2128636
38. <https://www.eea.europa.eu/> [интернет]. Европейское агентство по окружающей среде [дата обращения: 02.05.2023]. Доступ по ссылке: <https://www.eea.europa.eu/en>
39. Liu X., Hadiatullah H., Tai P., et al. Air pollution in Germany: spatio-temporal variations and their driving factors based on continuous data from 2008 to 2018 // *Environ Pollut*. 2021. Vol. 276. P. 116732. doi: 10.1016/j.envpol.2021.116732
40. <https://uk-air.defra.gov.uk/> [Internet]. UK AIR. Air Information Resource [дата обращения: 02.04.2023]. Доступ по ссылке: <https://uk-air.defra.gov.uk/networks/network-info>
41. Rodrigues V., Gama C., Ascenso A., et al. Assessing air pollution in European cities to support a citizen centered approach to air quality management // *Sci Total Environ*. 2021. Vol. 799. P. 149311. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149311
42. Kumar A., Gupta I., Brandt J. et al. Air quality mapping using GIS and economic evaluation of health impact for Mumbai City, India // *J Air Waste Manag Assoc*. 2016. Vol. 66, N 5. P. 470–481. doi: 10.1080/10962247.2016.1143887
43. Zhang F., Shi Y., Fang D., et al. Monitoring history and change trends of ambient air quality in China during the past four decades // *J Environ Manage*. 2020. Vol. 260. P. 110031. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.110031
44. Maji K.J., Dikshit A.K., Arora M., Deshpande A. Estimating premature mortality attributable to PM<sub>2.5</sub> exposure and benefit of Air Pollution Control Policies in China for 2020 // *Sci Total Environ*. 2018. Vol. 612. P. 683e693. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.254
45. Li X., Hussain S.A., Sobri S., Md Said M.S. Overviewing the air quality models on air pollution in Sichuan Basin, China // *Chemosphere*. 2021. Vol. 271. P. 129502. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129502
46. <http://www.gjsa.ru/> [интернет]. ГИС-Ассоциация [дата обращения: 02.04.2023]. Доступ по ссылке: <http://www.gjsa.ru/assoc.html>
47. Liu H., Yin S., Chen C., Duan Z. Data multi-scale decomposition strategies for air pollution forecasting: a comprehensive review // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 277. P. 124023. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124023
48. Белихов А.Б., Леготин Д.Л., Сухов А.К. Моделирование распространения атмосферных загрязнений с помощью системы SILAM // *Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова*. 2014. №1. С. 7–11.
49. Беляев Н.Н. Численные модели для прогноза загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта // *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 6. С. 25–32.
50. Rao S., Klimont Z., Smith S.J., et al. Future air pollution in the shared socioeconomic pathways // *Global Environmental Change*. 2017. Vol. 42. P. 346–358. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.012
51. Rao S.T., Luo H., Astitha M., et al. On the limit to the accuracy of regional-scale air quality models // *Atmos Chem Phys*. 2020. Vol. 20, N 3. P. 1627–1639. doi: 10.5194/acp-20-1627-2020
52. Porter P.S., Rao S.T., Hogrefe C., et al. Methods for reducing biases and errors in regional photochemical model outputs for use in emission reduction and exposure assessments // *Atmospheric Environment*. 2015. Vol. 112. P.178–188. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.04.039
53. Tella A., Balogun A.L. GIS-based air quality modelling: spatial prediction of PM10 for Selangor State, Malaysia using machine learning algorithms // *Environ Sci Pollut Res*. 2022. Vol. 29, N 57. P. 86109–86125. doi: 10.1007/s11356-021-16150-0
54. Оценка риска для здоровья от загрязнения воздуха — общие принципы. Копенгаген : Европейское региональное бюро ВОЗ, 2016.
55. Швыряев А.А., Меньшиков В.В. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе: учебное пособие для вузов. Москва : Изд-во МГУ. 2004. 124 с.
56. Меньшиков В.В., Швыряев А.А. Опасные химические процессы и техногенный риск: учебное пособие. Москва : Изд-во МГУ, 2003.

## REFERENCES

1. <https://www.who.int/ru/> [Internet]. Ambient (outdoor) air pollution. WHO Fact sheet [cited 2023 Mar 31]. Available from: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (In Russ).

2. Dominski FH, Branco JH, Buonanno G, et al. Effects of air pollution on health: a mapping review of systematic reviews and meta-analyses. *Environ Res.* 2021;201:111487. doi: 10.1016/j.envres.2021.111487
3. Chanchaeva EA, Gvozdzareva OV, Gvozdzarev AYu. Air quality and children's health: the role of increasing transport-related and thermal air pollution. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;26(11):12–19. (In Russ). doi: 10.33396/1728-0869-2019-11-12-19
4. World Health Organization. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide* [Internet]. 2021 [cited 2023 Mar 31]. Available from: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf> (In Russ).
5. Murav'eva SI, Bukovskij MI, Prohorova EK, i dr. *Rukovodstvo po kontrolju vrednyh veshhestv v vozduhe rabochej zony*. Moscow: Himija; 1991. 368 p. (In Russ).
6. <https://www.epa.gov/> [Internet]. United States Environmental Protection Agency. *NAAQS Table* [cited: 04.04.2023]. Available from: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
7. <https://environment.ec.europa.eu/> [Internet]. European Commission. Environment [cited 2023 Mar 31]. Available from: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
8. <https://www.eea.europa.eu/> [Internet]. European Environment Agency. Air quality standards [cited 2023 Apr 02]. Available from: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards>
9. Wang Z, Tan Y, Guo M, et al. Prospect of China's ambient air quality standards. *J Environ Sci (China)*. 2023;123:255–269. doi: 10.1016/j.jes.2022.03.036
10. Gong J, Ding L, Lu Y, et al. Scientometric and multidimensional contents analysis of PM<sub>2.5</sub> concentration prediction. *Heliyon*. 2023;9(3):e14526. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14526
11. Wang Y, Li J, Jing H, et al. Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement. *Aerosol Science and Technology*. 2015;49(11):1063–1077. doi: 10.1080/02786826.2015.1100710
12. Rai AC, Kumar P, Pilla F, et al. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Sci Total Environ*. 2017;607–608:691–705. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266
13. Koehler KA, Peters TM. New methods for personal exposure monitoring for airborne particles. *Curr Environ Health Rep*. 2015;2(4):399–411. doi: 10.1007/s40572-015-0070-z
14. Thomas A, Gebhart J. Correlations between gravimetry and light scattering photometry for atmospheric aerosols. *Atmospheric Environment*. 1994;28(5):935–938. doi: 10.1016/1352-2310(94)90251-8
15. Northcross AL, Edwards RJ, Johnson MA, et al. A low-cost particle counter as a real-time fine-particle mass monitor. *Environ Sci Process Impacts*. 2013;15(2):433–439. doi: 10.1039/c2em30568b
16. Sousan S, Koehler K, Thomas G, et al. Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols. *Aerosol Sci Technol*. 2016;50(5):462–473. doi: 10.1080/02786826.2016.1162901
17. Fine GF, Cavanagh LM, Afonja A, Binions R. Metal oxide semiconductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors (Basel)*. 2010;10(6):5469–5502. doi: 10.3390/s100605469
18. Aleixandre M, Gerboles M. Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas. *Chemical Engineering Transactions*. 2012;30.
19. Piedrahita R, Xiang Y, Masson N, et al. The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2014;7(10):3325–3336. doi: 10.5194/amt-7-3325-2014
20. Stetter JR, Li J. Amperometric gas sensors — a review. *Chem Rev*. 2008;108(2):352–366. doi: 10.1021/cr0681039
21. Spinelle L, Gerboles M, Aleixandre M, Bonavitacol F. Evaluation of metal oxides sensors for the monitoring of O<sub>3</sub> in ambient air at ppb level. *Chemical Engineering Transactions*. 2016;54: 319–324.
22. Karagulian F, Gerboles M, Barbieri M, et al. *Review of sensors for air quality monitoring*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2019.
23. Chloe C. Over 6,000 cities now monitor air quality, WHO reveals. *Air Quality News*. 2022. Available from: <https://airqualitynews.com/2022/04/04/over-6000-cities-now-monitor-air-quality-who-reveals/>
24. <https://aqicn.org/> [Internet]. World Air Quality Index. Worldwide Air Quality Monitoring Data Coverage [cited 2023 Apr 02]. Available from: <https://aqicn.org/sources/>
25. Lin C, Li Y, Yuan Z, et al. Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM<sub>2.5</sub>. *Remote Sensing of Environment*. 2015;156:117–128. doi: 10.1016/j.rse.2014.09.015
26. Hua Z, Sun W, Yang G, Du Q. A full-coverage daily average PM<sub>2.5</sub> retrieval method with two-stage IVW fused MODIS C6 AOD and two-stage GAM model. *Remote Sensing*. 2019;11(13):1558. doi: 10.3390/rs11131558
27. Zhao R, Gu X, Xue B, et al. Short period PM<sub>2.5</sub> prediction based on multivariate linear regression model. *PLoS One*. 2018;13(7):e0201011. doi: 10.1371/journal.pone.0201011
28. Li T, Guo Y, Liu Y, et al. Estimating mortality burden attributable to short-term PM<sub>2.5</sub> exposure: a national observational study in China. *Environ Int*. 2019;125:245–251. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.073
29. Ford B, Heald CL. Exploring the uncertainty associated with satellite-based estimates of premature mortality due to exposure to fine particulate matter. *Atmos Chem Phys*. 2016;16(5):3499–3523. doi: 10.5194/acp-16-3499-2016
30. van Donkelaar A, Martin RV, Levy RC, et al. Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events: a case study of the Moscow fires in 2010. *Atmospheric Environment*. 2011;45(34):6225–6232. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.07.068
31. Holben BN, Kim J, Sano I, et al. An overview of mesoscale aerosol processes, comparisons, and validation studies from DRAGON networks. *Atmos Chem Phys*. 2018;18(2):655–671. doi: 10.5194/acp-18-655-2018
32. Sorek-Hamer M, Chatfield R, Liu Y. Review: strategies for using satellite-based products in modeling PM<sub>2.5</sub> and short-term pollution episodes. *Environ Int*. 2020;144:106057. doi: 10.1016/j.envint.2020.106057

33. <https://ecologyofrussia.ru/> [Internet]. Federal project "Chisty vozdukh" [cited 2023 Apr 02]. Available from: <https://ecologyofrussia.ru/proekt/chisty-vozduh> (In Russ).
34. <https://www.feerc.ru/> [Internet]. Nacional'nyj proekt "Jekologija". Federal project "Chisty vozdukh" [cited 2023 Apr 02]. Available from: <http://www.feerc.ru/uisem/portal/> (In Russ).
35. <https://www.meteorf.gov.ru/> [Internet]. Structure of Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia (Roshydromet) [cited 2023 May 03]. Available from: <https://www.meteorf.gov.ru/about/structure/local/> (In Russ).
36. <https://www.epa.gov/> [Internet]. EPA AQS (Air Quality System) [cited 2023 Apr 02]. Available from: <https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data/air-data-basic-information>
37. Byun D, Schere K. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system. *Appl Mech Rev.* 2006;59(2):51–77. doi: 10.1115/1.2128636
38. <https://www.eea.europa.eu/> [Internet]. European Environmental Agency [cited 2023 May 02]. Available from: <https://www.eea.europa.eu/en> (In Russ).
39. Liu X, Hadiatullah H, Tai P, et al. Air pollution in Germany: spatio-temporal variations and their driving factors based on continuous data from 2008 to 2018. *Environ Pollut.* 2021;276:116732. doi: 10.1016/j.envpol.2021.116732
40. <https://uk-air.defra.gov.uk/> [Internet]. UK AIR. Air Information Resource [cited 2023 Apr 02]. Available from: <https://uk-air.defra.gov.uk/networks/network-info>
41. Rodrigues V, Gama C, Ascenso A, et al. Assessing air pollution in European cities to support a citizen centered approach to air quality management. *Sci Total Environ.* 2021;799:149311. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149311
42. Kumar A, Gupta I, Brandt J, et al. Air quality mapping using GIS and economic evaluation of health impact for Mumbai City, India. *J Air Waste Manag Assoc.* 2016;66(5):470–481. doi: 10.1080/10962247.2016.1143887
43. Zhang F, Shi Y, Fang D, et al. Monitoring history and change trends of ambient air quality in China during the past four decades. *J Environ Manage.* 2020;260:110031. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.110031
44. Maji KJ, Dikshit AK, Arora M, Deshpande A. Estimating premature mortality attributable to PM<sub>2.5</sub> exposure and benefit of Air Pollution Control Policies in China for 2020. *Sci Total Environ.* 2018;612:683e693. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.254
45. Li X, Hussain SA, Sobri S, Md Said MS. Overviewing the air quality models on air pollution in Sichuan Basin, China. *Chemosphere.* 2021;271:129502. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129502
46. <http://www.gisa.ru/> [Internet]. GIS-Association [cited 2023 Apr 02]. Available from: <http://www.gisa.ru/assoc.html> (In Russ).
47. Liu H, Yin S, Chen C, Duan Z. Data multi-scale decomposition strategies for air pollution forecasting: a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production.* 2020;277:124023. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124023
48. Belikhov AB, Legotin DL, Sukhov AK. Modelirovaniye rasprostraneniya atmosferykh zagryazneniy s pomoshch'yu sistemy SILAM. *Vestnik KGU im. N.A. Nekrasova.* 2014;1:7–11. (In Russ).
49. Beljaev NN. Chislennyye modeli dlja prognoza zagryazneniya atmosfernogo vozduha vybrosami avtotransporta. *Nauka ta progres transportu.* 2016;(6):25–32. (In Russ).
50. Rao S, Klimont Z, Smith SJ, et al. Future air pollution in the shared socioeconomic pathways. *Global Environmental Change.* 2017;42:346–358. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.012
51. Rao ST, Luo H, Astitha M, et al. On the Limit to the accuracy of regional-scale air quality models. *Atmos Chem Phys.* 2020;20(3):1627–1639. doi: 10.5194/acp-20-1627-2020
52. Porter PS, Rao ST, Hogrefe C, et al. Methods for reducing biases and errors in regional photochemical model outputs for use in emission reduction and exposure assessments. *Atmospheric Environment.* 2015;112:178–188. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.04.039
53. Tella A, Balogun AL. GIS-based air quality modelling: spatial prediction of PM10 for Selangor State, Malaysia using machine learning algorithms. *Environ Sci Pollut Res.* 2022;29(57):86109–86125. doi: 10.1007/s11356-021-16150-0
54. *Otsenka riska dlya zdorov'ya ot zagryazneniya vozdukh — obshchiye printsipy.* Kopenhagen: Yevropeyskoye regional'noye byuro VOZ; 2016. (In Russ).
55. Shvyryayev AA, Men'shikov VV. *Otsenka riska vozdeystviya zagryazneniya atmosfery v issleduyemom regione: Uchebnoye posobiye dlya vuzov.* Moscow: Izdatel'stvo MGU; 2004. 124p. (In Russ).
56. Men'shikov VV, Shvyryayev AA. *Opasnyye khimicheskiye protsessy i tekhnogenny risk: uchebnoye posobiye.* Moscow: Izdatel'stvo MGU; 2003. (In Russ).

## ОБ АВТОРАХ

\* **Поздняков Михаил Валерьевич**, к.ф.-м.н.;  
адрес: Российская Федерация, 410022, Саратов, ул. Заречная,  
здание 1А, строение 1;  
ORCID: 0000-0002-2067-3830;  
eLibrary SPIN: 6726-4542;  
e-mail: mpozdneyakov@yandex.ru

**Мазилев Святослав Игоревич**, к.б.н.;  
ORCID: 0000-0002-8220-145X;  
eLibrary SPIN: 2048-0643;  
e-mail: smazilov@ya.ru

**Райкова Светлана Владимировна**, к.м.н., доцент;  
ORCID: 0000-0001-5749-2382;  
eLibrary SPIN: 1286-5149;  
e-mail: matiz853@yandex.ru

**Гусев Юрий Сергеевич**, к.б.н.;  
ORCID: 0000-0001-7379-484X;  
eLibrary SPIN: 1776-5237;  
e-mail: yuran1989@yandex.ru

**Комлева Наталия Евгеньевна**, д.м.н.;  
ORCID: 0000-0003-4099-9368;  
eLibrary SPIN: 7145-3073;  
e-mail: nekomleva@yandex.ru

**Микеров Анатолий Николаевич**, д.б.н.;  
ORCID: 0000-0002-0670-7918;  
eLibrary SPIN: 1456-5471;  
e-mail: mail@smnccg.ru

## AUTHORS' INFO

\* **Michail V. Pozdneyakov**, Cand. Sci. (Phys. and Math.);  
address: building 1A, edifice 1 Zarechnaya street, 410022 Saratov,  
Russian Federation;  
ORCID: 0000-0002-2067-3830;  
eLibrary SPIN: 6726-4542;  
e-mail: mpozdneyakov@yandex.ru

**Svyatoslav I. Mazilov**, Cand. Sci. (Biol.);  
ORCID: 0000-0002-8220-145X;  
eLibrary SPIN: 2048-0643;  
e-mail: smazilov@ya.ru

**Svetlana V. Raikova**, MD, Cand. Sci. (Med.), associate professor;  
ORCID: 0000-0001-5749-2382;  
eLibrary SPIN: 1286-5149;  
e-mail: matiz853@yandex.ru

**Yury S. Gusev**, Cand. Sci. (Biol.);  
ORCID: 0000-0001-7379-484X;  
eLibrary SPIN: 1776-5237;  
e-mail: yuran1989@yandex.ru

**Natalia E. Komleva**, MD, Dr. Sci. (Med.);  
ORCID: 0000-0003-4099-9368;  
eLibrary SPIN: 7145-3073;  
e-mail: nekomleva@yandex.ru

**Anatoly N. Mikerov**, Dr. Sci. (Biol.);  
ORCID: 0000-0002-0670-7918;  
eLibrary SPIN: 1456-5471;  
e-mail: mail@smnccg.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author