

УДК 504.3.054

СТАТИСТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ДИОКСИДА АЗОТА В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2026 г. С. Г. Крицук^{1,2}, И. Ш. Латыпов^{1,2}, В. И. Горный^{1,2}, А. А. Тронин^{1,2},
М. П. Васильев^{1,2,*}, Г. М. Неробелов^{1,2}, И. А. Серебрицкий³

¹Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук (НИЦЭБ РАН), Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский Федеральный центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Россия

³Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности, Администрация Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: mih.vasilev@mail.ru

Поступила в редакцию 09.01.2025 г.

После доработки 12.08.2025 г.

Принята к публикации 20.10.2025 г.

В статье представлены результаты оценки рисков превышения предельно допустимых концентраций диоксида азота в атмосферном воздухе Санкт-Петербурга на основе данных измерений на 16 автоматических станциях мониторинга в 2019–2021 гг. и зависимости концентраций от времени суток и сезона. Диоксид азота является высокотоксичным веществом и относится ко второму классу опасности. Это определяет необходимость учета распределения концентраций диоксида азота при городском территориальном планировании. В результате проведенного исследования было определено, что вариации концентраций NO_2 определяются взаимодействием нескольких квазипериодических процессов: сезонными и суточными вариациями плотности транспортных потоков, изменением интенсивности солнечной радиации и связанных с ней фотохимических реакций с участием диоксида азота, а также интенсивности метеорологических явлений. Статистические распределения концентраций NO_2 асимметричны, их предпочтительным приближением является логнормальная модель. Риски превышения среднесуточных предельно допустимых концентраций диоксида азота (по СанПин 1.2.3685-21) находятся в пределах 0.0–1.1%, а при использовании предельно допустимых концентраций, рекомендованных ВОЗ, — в диапазоне 3–20%. Приведенный в статье подход к оценке рисков превышения предельно допустимых концентраций диоксида азота может быть применен и для анализа концентраций других экотоксикантов, негативно воздействующих на здоровье населения или нарушений городской среды.

Ключевые слова: диоксид азота, статистические распределения, Санкт-Петербург, нормальное распределение, логнормальное распределение, риск превышения ПДК

DOI: 10.7868/S2658697526020105

ВВЕДЕНИЕ

Диоксид азота (NO_2) — один из наиболее опасных аэротоксикантов, негативно влияющих на здоровье населения. Диоксид азота относится ко второму классу опасности, что говорит о высокой степени его токсичности. По данным Европейского агентства по окружающей среде (ЕЕА) около 1% смертей в Европейском Союзе в 2022 г. атрибутировано как связанные с концентрациями диоксида

азота, превышающими 10 мкг/м³ (<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/harm-to-human-health-from-air-pollution-2024>). Аномальные концентрации диоксида азота имеют антропогенную природу и могут превышать фоновые — 0.0002–0.01 мкг/м³ (Sportisse, 2010) на несколько порядков. Время жизни NO_2 варьирует в пределах нескольких часов и зависит, в частности, от скорости химических реакций с участием окислов азота (Sportisse, 2010). Основные источники двуокиси

азота (более 70%) носят антропогенный характер, среди них доминируют продукты сгорания минерального топлива в двигателях внутреннего сгорания, на теплоэлектростанциях, на металлургических и других производствах (Безуглая, Смирнова, 2008; Тронин и др., 2019). Поскольку на транспорт и производство электроэнергии приходится львиная доля выбросов [более 80% (Seinfeld and Pandis, 2016)], высокие концентрации газа характерны для крупных городов. В последние десятилетия в крупных городах (Тронин и др., 2023) наблюдается уменьшение концентрации диоксида азота, что, вероятно, связано с изменением транспортной ситуации, а именно с внедрением более высоких экологических стандартов, а также в переводе на газ энергетического комплекса, что согласно нормативам (Нормативы ..., 2013; Таймаров и др., 2016) приводит к снижению концентрации двуокиси азота в дымовых газах в 2–3 раза.

В Санкт-Петербурге более 20 лет назад по инициативе Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Администрации Санкт-Петербурга введена в строй автоматизированная система контроля состояния атмосферного воздуха, в которую в настоящее время входит 25 автоматических станций мониторинга (АСМ), расположенных во всех районах города. За время наблюдений в приземной атмосфере Санкт-Петербурга ни на одной АСМ не зарегистрировано превышение предельно допустимой среднегодовой концентрации двуокиси азота, хотя на некоторых станциях среднесуточные концентрации двуокиси азота время от времени превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) (табл. 1), рекомендованные Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ)¹.

¹ World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>.

Таблица 1. Предельно допустимые концентрации по российским нормам и рекомендациям ВОЗ, современные и действовавшие в период измерений

ПДК, мг/м ³	Россия, САНПИН 1.2.3685-21	Рекомендации ВОЗ*	Россия (до 2022 г.), ГН 2.1.6.3492-17	Рекомендации ВОЗ до 2022 г.
Разовая (ПДК _р)	0.2	0.2	0.085	0.2
Среднесуточная (ПДК _{сс})	0.1	0.025	0.04	0.04

Примечание: * World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>.

Для принятия управленческих решений в области экологической безопасности и охраны здоровья населения необходимы оценки потенциальных экономических потерь от ущерба здоровью населения, для которых необходимо знание рисков превышения ПДК двуокиси азота, экспозиций (продолжительности контакта токсического вещества с организмом) и доз (количество токсиканта, ассимилированного организмом). В европейском законодательстве уже появились соответствующие нормы (Directive ..., 2024), ограничивающие риски превышения ПДК.

Целью настоящего исследования является поиск и применение подходов к расчету рисков превышения ПДК значений NO₂ в условиях редкого появления этих событий в приземной атмосфере Санкт-Петербурга. Приведенный в статье подход к оценке рисков превышения ПДК концентраций диоксида азота может быть применен и для анализа концентраций других экотоксикантов, негативно воздействующих на здоровье населения или нарушений городской среды и приводящих к значительным эколого-экономическим ущербам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа пространственно-временного распределения концентрации двуокиси азота по территории Санкт-Петербурга были использованы данные 16 автоматических станций мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга, принадлежащей Комитету по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности (рис. 1).

Концентрации диоксида азота измеряются на станциях с 20-минутным осреднением (72 измерения в сутки для каждого загрязняющего вещества) аппаратурой фирм ПромЭкоПрибор (<https://www.promecopribor.ru>) и ОПТЭК (<https://www.optec.ru>) с номинальными относительными погрешностями 20%. Для обработки

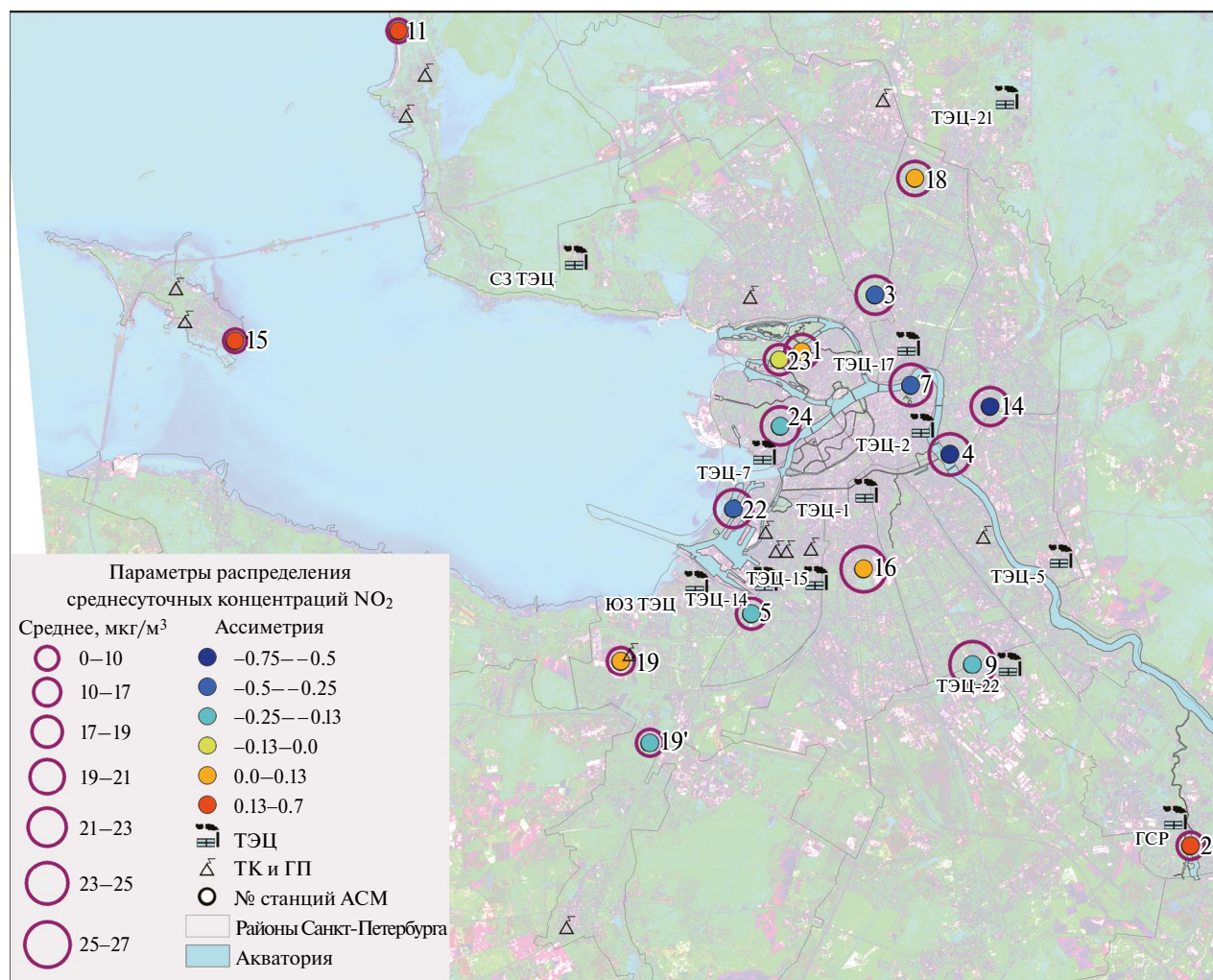


Рис. 1. Пункты контроля состояния атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге и потенциальные стационарные источники двуокиси азота: ТЭЦ — теплоэлектроцентрали; ТК — котельные; ГП — “горячие” производства. АСМ — станции мониторинга и параметры логнормальной модели распределения концентрации двуокиси азота на них.

данных использованы стандартные статистические оценки и критерии. Объем выборки (ок. 80000 измерений) допускает оценки рисков [вероятностей превышения ПДК диоксида азота (см. табл. 1)] и других параметров распределений разовых и среднесуточных концентраций. В исследовании использованы как российский стандарт ПДК значений NO_2 , так и стандарты ВОЗ. Для большей части АСМ риски можно оценить, как на основе частоты встречаемости, так и с использованием параметров модельных распределений.

Концентрации двуокиси азота в приземной атмосфере городов формируются под воздействием нескольких зависящих от времени факторов, существенные вариации концентраций во времени приводит к правой асимметрии их распределения (рис. 3), а наиболее близкой к данным измерений моделью распределения на основе критических значений асимметрии становится логнормальная. Аналогичный ре-

зультат получен для распределения приземных концентраций двуокиси азота в Москве (Еланский и др., 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В зависимости от значения ПДК (см. табл. 1) оценка риска (вероятности) ее превышения может проводиться как на основе частоты встречаемости, так и на основе параметров модельных распределений. Анализ распределений разовых и среднесуточных концентраций за весь период (2019–2021) показал (табл. 2), что:

1. значение 0.04 мг/м^3 , равное среднесуточному ПДК в 2019–2021 гг. лежит, как правило, внутри диапазона измеренных значений;

2. если не рассматривать “пригородные” АСМ в Кронштадте и Сестрорецке, концентрации двуокиси азота не ассоциируют с расстоянием ни до ближайшей ТЭЦ, ни до ближайшей оживленной магистрали;

Таблица 2. Характеристики распределений концентраций диоксида азота на АСМ по данным за 2019–2021 гг., мкг/м^3 , рассчитанные в соответствии с нормальной (N) и логнормальной (LN) моделями распределения

АСМ	20-минутные				среднесуточные			
	N		LN		N		LN	
	М	А	М	А	М	А	М	А
№ 15 Кронштадт	13	2.75	11	0.50	12	2.32	10	0.57
№ 11 Сестрорецк	15	2.26	11	0.47	14	2.12	10	0.62
№ 2 Колпино	20	1.74	16	0.05	19	1.20	16	0.16
№ 19 Сосновая поляна	19	1.85	15	–0.01	19	1.82	15	–0.05
№ 19' КАД-Таллинское шоссе	21	1.73	16	0.08	21	1.26	16	–0.03
№ 23 пр. Динамо	24	1.34	19	–0.21	23	1.16	18	–0.06
№ 5 Дачное	26	1.38	20	–0.29	25	1.18	19	–0.25
№ 1 устье Карповки	26	1.90	21	–0.06	26	1.47	20	0.10
№ 18 Гражданка	26	1.78	21	–0.21	26	1.49	20	0.04
№ 24 Васильевский	27	1.61	22	–0.33	26	1.26	21	–0.25
№ 14 Охта	26	1.22	22	–0.44	26	0.61	21	–0.67
№ 22 Канонерский	30	2.67	22	–0.35	29	0.63	21	–0.26
№ 16 парк Победы	29	1.23	24	–0.41	29	1.27	24	–0.02
№ 3 Кушелевка	30	1.34	24	–0.35	29	0.87	22	–0.28
№ 7 Водопроводный	29	1.18	25	–0.32	29	0.88	24	–0.29
№ 4 Малая Охта	29	0.89	25	–0.58	29	0.67	25	–0.53
№ 9 Купчино	32	1.59	26	–0.46	31	1.30	25	–0.13

Примечание: пункты упорядочены в соответствии со средними концентрациями. АСМ № 19 в конце 2019 г. поменяла положение — для № 19' даны данные за 2019 г., а для № 19 за 2020–2021 гг. М — среднее значение, А — асимметрия.

3. самые низкие концентрации наблюдаются в Кронштадте и Сестрорецке — в прибрежной зоне Финского залива далеко от потенциальных источников двуокиси азота. Другими словами, разница в средних концентрациях есть только между данными АСМ, расположенными в районах с плотной городской застройкой и озелененных районах с малоэтажной застройкой. Близкие результаты известны, например, для Москвы (Еланский и др., 2018);

4. распределения концентраций, как правило, не удовлетворяют, а лишь приближаются к теоретическим распределениям. Распределения концентраций асимметричны и эксцентричны, асимметрия и эксцесс гауссовой модели обычно высокие положительные, логнормальной — как правило, небольшие отрицательные. Когда значение асимметрии не позволяет отклонить гипотезу о нормальном или логнормальном распределении, ее мешает принять значение эксцесса. Значения асимметрии (см. табл. 2)

и эксцесса распределения концентраций для логнормальной модели ближе к критическим значениям (для гипотезы принадлежности распределения модельному), чем для нормальной модели, в качестве “базовой” лучше выбрать логнормальную модель.

Риски превышения разовых предельно допустимых концентраций двуокиси азота (табл. 3) оценены для различных моделей распределения, среди которых, как уже отмечалось, наиболее приемлема логнормальная. Риски превышения разовых ПДК для АСМ на окраинах города (№ 15, № 11, № 2, № 19) заметно ниже и достигают лишь тысячных долей процента. Риски превышения ПДК = 0.085 мг/м^3 , действовавшего в период наблюдений, обычно варьируют в пределах 0.01–0.05 и только на окраинах Санкт-Петербурга (№ 15, № 11, № 2, № 19) снижаются до долей процента. Концентрации выше 0.2 мг/м^3 следует считать редкими событиями, поскольку риски их достижения в целом

Таблица 3. Риски превышения разовых ПДК по российским нормам и рекомендациям ВОЗ (современным и действовавшим в период измерений) для различных моделей распределения

ПДК, мг/м ³	Риск							
	0.2 (после 2022 г.)			0.085 (до 2022 г.)				
	E	N	LN	E	N	ϵ_N	LN	ϵ_{LN}
АСМ								
№ 15 Кронштадт	3E-05	0.0	6.E-06	0.0008	1E-10	39	0.001	20
№ 11 Сестрорецк	0.0	0.0	5.E-05	0.0023	9E-08	19	0.003	13
№ 2 Колпино	0.0	0.0	0.0001	0.003	5E-06	8	0.008	25
№ 19 Сосновая поляна	0.0	0.0	0.0001	0.003	7E-07	33	0.008	4
№ 19' КАД–Таллинское шоссе	—	—	—	0.006	1.2E-05	20	0.009	13
№ 23 пр. Динамо	0.0	0.0	0.0008	0.005	2E-04	21	0.022	9
№ 5 Дачное	8E-05	0.0	0.0014	0.009	0.001	25	0.029	7
№ 1 устье Карповки	7E-05	0.0	0.0013	0.020	0.003	17	0.031	11
№ 18 Гражданка	1E-04	0.0	0.0007	0.012	0.0009	23	0.024	6
№ 24 Васильевский	8E-05	0.0	0.0009	0.013	0.0010	24	0.029	7
№ 14 Охта	0.0	0.0	0.0004	0.005	0.0001	23	0.019	7
№ 22 Канонерский	2E-04	2E-14	0.004	0.019	0.007	24	0.053	8
№ 16 парк Победы	1E-05	0.0	0.0002	0.007	5E-04	32	0.019	10
№ 3 Кушелевка	3E-05	1E-14	0.003	0.022	0.007	17	0.051	9
№ 7 Водопроводный	0.0	0.0	0.0002	0.006	3E-04	16	0.017	13
№ 4 Малая Охта	0.0	0.0	0.0003	0.004	2E-04	23	0.022	11
№ 9 Купчино	0.0003	0.0	0.0011	0.015	0.004	26	0.041	6

Примечания: модель распределения: E — согласно частоте встречаемости; N — по параметрам нормального распределения; LN — по параметрам логнормального распределения. Погрешности оценки рисков (верхние пределы ошибок аппроксимации — с вероятностью 90%), для нормальной (ϵ_N) и логнормальной (ϵ_{LN}) модели, %.

Таблица 4. Риски превышения среднесуточных предельно допустимых концентраций по российским нормам и рекомендациям ВОЗ (современным и действовавшим в период измерений) для различных моделей распределения

ПДК, мг/м ³	Риск							
	0.1 (после 2022 г.)			0.04 (до 2022 г.)				
	E	N	LN	E	N	ϵ_N	LN	ϵ_{LN}
АСМ								
№ 15 Кронштадт	0.0	0.0	1E-06	0.014	1.5E-04	58	0.002	24
№ 11 Сестрорецк	0.0	0.0	5E-05	0.025	0.004	15	0.010	6
№ 2 Колпино	0.0	0.0	6E-05	0.037	0.016	11	0.026	13
№ 19 Сосновая поляна	0.0	0.0	8E-10	0.001	0.001	27	0.002	5
№ 19' КАД-Таллинское шоссе	—	—	—	0.029	0.034	17	0.037	10
№ 23 пр. Динамо	0.0	7E-10	0.0013	0.111	0.095	19	0.078	4
№ 5 Дачное	0.0009	2E-07	0.005	0.144	0.151	21	0.121	7
№ 1 устье Карповки	0.004	4E-06	0.005	0.173	0.197	11	0.135	6
№ 18 Гражданка	0.0009	5E-09	0.0007	0.131	0.136	29	0.086	11
№ 24 Васильевский	0.0009	2E-09	0.0010	0.128	0.139	29	0.104	12
№ 14 Охта	0.0	1E-11	0.0008	0.100	0.105	10	0.099	9
№ 22 Канонерский	0.0013	6E-06	0.011	0.252	0.245	14	0.171	13
№ 16 парк Победы	0.0	6E-10	0.0003	0.152	0.171	19	0.130	5
№ 3 Кушелевка	0.0009	1E-05	0.011	0.241	0.248	12	0.179	8
№ 7 Водопроводный	0.0	0.0	9E-06	0.095	0.093	25	0.068	8
№ 4 Малая Охта	0.0	2E-09	0.0013	0.166	0.184	19	0.154	6
№ 9 Купчино	0.002	2E-06	0.003	0.235	0.274	24	0.195	8

Примечания: модель распределения: E — согласно частоте встречаемости; N — по параметрам нормального распределения; LN — по параметрам логнормального распределения. Погрешности оценок рисков для нормальной (ϵ_N) и логнормальной (ϵ_{LN}) модели, %.

не превышают сотых долей процента. Однако на некоторых АСМ они оказываются выше 0.1%² что связано, вероятно, с экстраординарными событиями (как, например, пожаром в Купчино 27 мая 2020 г.).

Риски превышения среднесуточных ПДК оценены для различных моделей распределения, наиболее приемлема оценка по параметрам логнормального распределения. Концентрации выше 0.1 мг/м³ (САНПИН 1.2.3685-21) следует считать редкими событиями, поскольку риски их достижения в целом не превышают десятых долей процента³.

Риски превышения среднесуточных ПДК 0.04 мг/м³ — нормы, действовавшей в период наблюдений, лишь на окраинах Санкт-Петербурга (№ 15, № 11, № 2, № 19) снижаются до первых процентов, обычно варьируя около 10–15%⁴ (табл. 4, рис. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрации двуокиси азота в приземной атмосфере городов формируются при взаимодействия квазипериодических эмиссии, стока и рассеяния. Эмиссия NO₂ зависит от суточных, недельных и сезонных вариаций мощности

энергетического комплекса и плотности транспортных потоков. Сток-рассеяние — от интенсивности метеорологических явлений и вариаций скорости фотохимических реакций с участием двуокиси азота. В результате наблюдается ярко выраженные сезонный и суточный (см. рис. 3) ход концентраций двуокиси азота, различные моды и размах (см. рис. 2) в частных, например, месячных распределениях концентраций. Сходные сезонные и суточные вариации широко обсуждаются в литературе [например, (Еланский и др., 2015, 2022)], где обоснованы выводы о возможных причинах этих вариаций с привлечением данных о концентрациях других поллютантов и параметров атмосферы.

Вариации концентраций NO₂ в течение суток (см. рис. 3) вследствие непостоянства эмиссии-стока приводят к наличию тяжелого “правого хвоста” в распределении разовых концентраций, которое, таким образом, тяготеет к логнормальному (например, как на рис. 2а). Годовое распределение среднесуточных концентраций двуокиси азота, включающее в себя месячные распределения с различными модами, всегда будет квази-логнормальным и, следовательно, в качестве средних годовых оценок предпочтительнее использовать среднее геометрическое (и соответствующий ему фактор вариации) (см. рис. 2б). Сравнение погрешностей оценки риска (см. табл. 3) для нормальной ϵ_N и логнормальной ϵ_{LN} моделей подтверждает этот вывод.

Распределения концентраций (и их параметры) заметно изменяются как в течение суток, так и течение года. Рисунок 3 представляет характерные для большинства АСМ временные

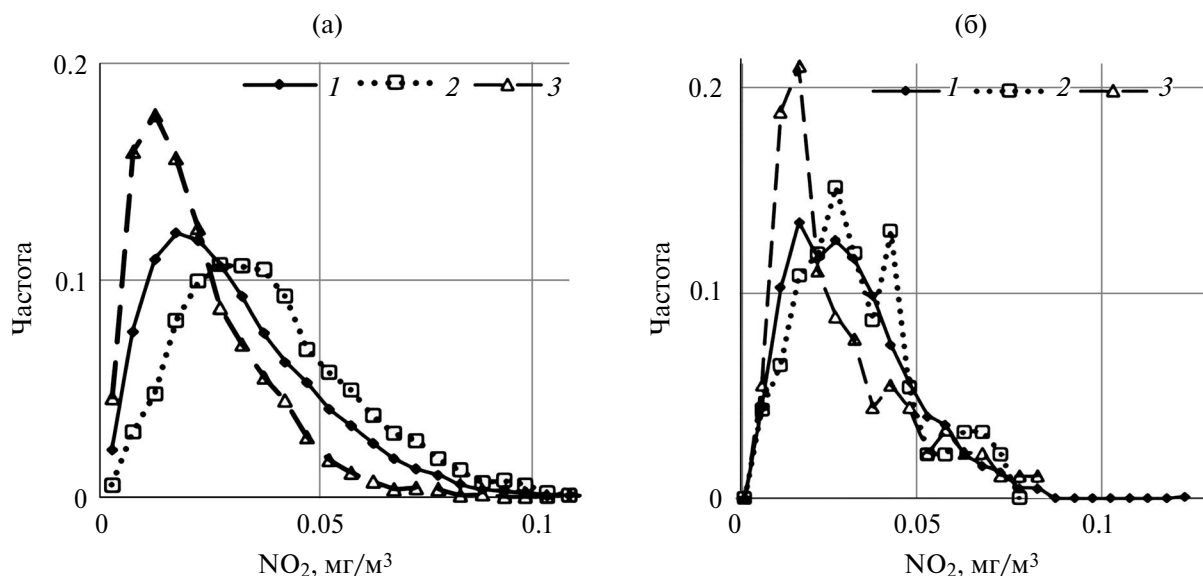


Рис. 2. Сезонные вариации распределения концентраций двуокиси азота: всесезонное (годовое), позднелетнее и летнее в Купчино № 9. Разовые (а) и среднесуточные (б) концентрации. 1 — год в целом; 2 — март; 3 — июль (фактор вариации — экспонента от стандартного отклонения натуральных логарифмов концентраций).

вариации средних концентраций. Характерные утренний и вечерний максимумы (см. рис. 3а) и разделяющие их минимумы суточных вариаций концентраций NO_2 неоднократно описаны [например, (Ионов, Поберовский, 2020)]. Для их объяснения с точки зрения стока-накопления предложены эмпирические модели (Еланский и др., 2022; Локощенко и др., 2021), однако с точки зрения влияния эмиссии, связываемой с переменной во времени транспортной активностью, обоснование моделей пока что ненадежно.

Для обоснования причин сезонных вариаций концентраций NO_2 (см. рис. 3б) требуются более сложные модели [например, (Nerobelov et al., 2024)], верификация которых из-за недостатка данных об эмиссиях затруднена. Рост концентраций NO_2 с ноября по апрель в ночное время (см. рис. 3б, кривая 1), отчасти связанный, вероятно, с режимом работы теплоэнергетики (Еланский и др., 2022), интерпретируется менее однозначно, по сравнению с поведением концентраций NO_2 в утренние часы.

В соответствие с временными вариациями концентраций NO_2 (см. рис. 3) изменяются и риски превышения ПДК. Закономерные вариации, сходные с суточным и сезонным ходом концентраций будут наблюдаться для рисков более $\sim 1\%$. Для редких событий, например, превышения разовых концентраций 0.2 мг/м^3 , риски могут варьировать во времени и пространстве незакономерно, поскольку они связаны с экстраординарными событиями. Сезонный фактор вариации рисков (отношение максимальных, в ряду сезонных вариаций, значений к минимальным), достигающий значения 5 и более, превосходит сезонный фактор вариации средних

содержаний. Зимой пространственные вариации рисков выше, чем летом (см. кривые 1–3 на рис. 4а, б). Утром в период наиболее плотных транспортных потоков (рис. 4в) риски возрастают по сравнению с предутренними часами (до 1.5 раз и более), сезонный фактор вариации рисков в это время суток достигает значения 7. Сезонное поведение рисков в “предзвездное” время (рис. 4г), когда в суточном ходе концентраций наблюдается минимум (см. рис. 3а), сходно с поведением среднемесячных концентраций (см. рис. 3б), то есть высокие значения наблюдаются весной и в начале лета, когда рост рисков обеспечивается главным образом за счет роста дисперсии концентраций. Амплитуда вариации рисков выше амплитуды вариации средних значений концентраций.

Хотя пространственные вариации рисков достаточно велики, однако они, как и средние концентрации NO_2 , не связаны с расстояниями до ближайших потенциальных источников двуокиси азота. Повышенные значения рисков (рис. 6) тяготеют скорее к центральной части города, а пониженные — к окраинам. Сравнение рисков в январе–марте с рисками в июне–августе позволяет сделать вывод, что среди основных источников двуокиси азота в приземной атмосфере — теплоэнергетического комплекса и транспорта — влияние первого вероятно выше, по крайней мере, для АСМ № 9 и № 16, а для АСМ № 1, № 7, № 22, напротив, вклад транспорта существеннее.

Погрешности оценивания рисков зависят от погрешностей аппроксимации эмпирического распределения концентраций модельной функцией (выбора модели), параметров этой модели, величины ПДК и размера выборки.

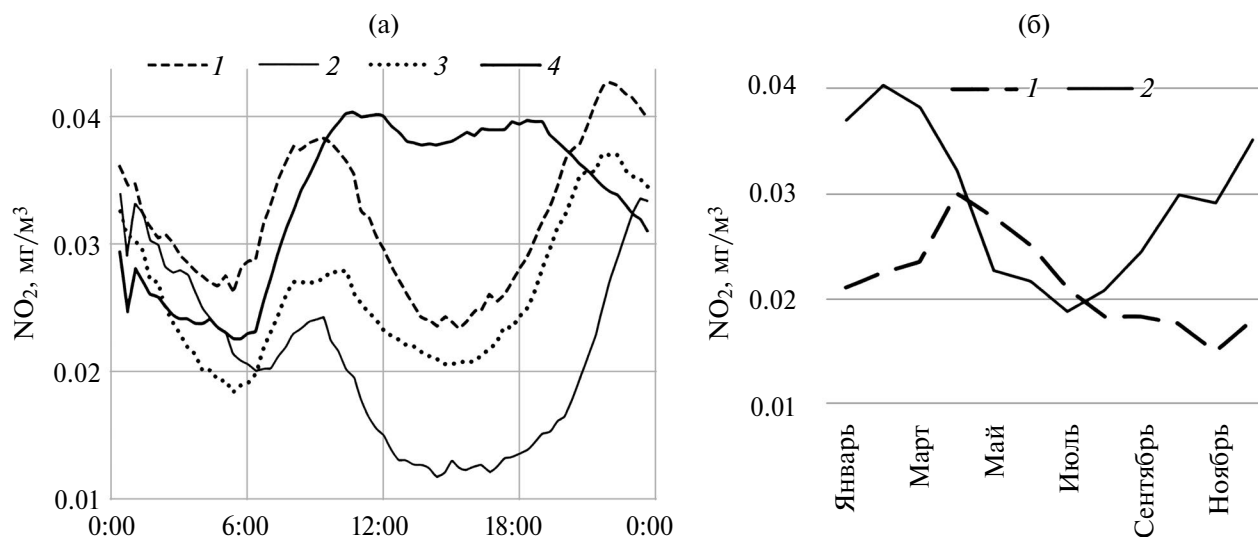


Рис. 3. Суточный ход (а) концентрации двуокиси азота на АСМ № 3 в различные сезоны года: 1 — март–апрель; 2 — июнь–июль; 3 — август–сентябрь; 4 — ноябрь–январь. Сезонный ход (б) концентрации двуокиси азота на АСМ № 18 в периоды ночного минимума 2:00–5:00 (1) и утреннего максимума 9:00–11:00 (2).

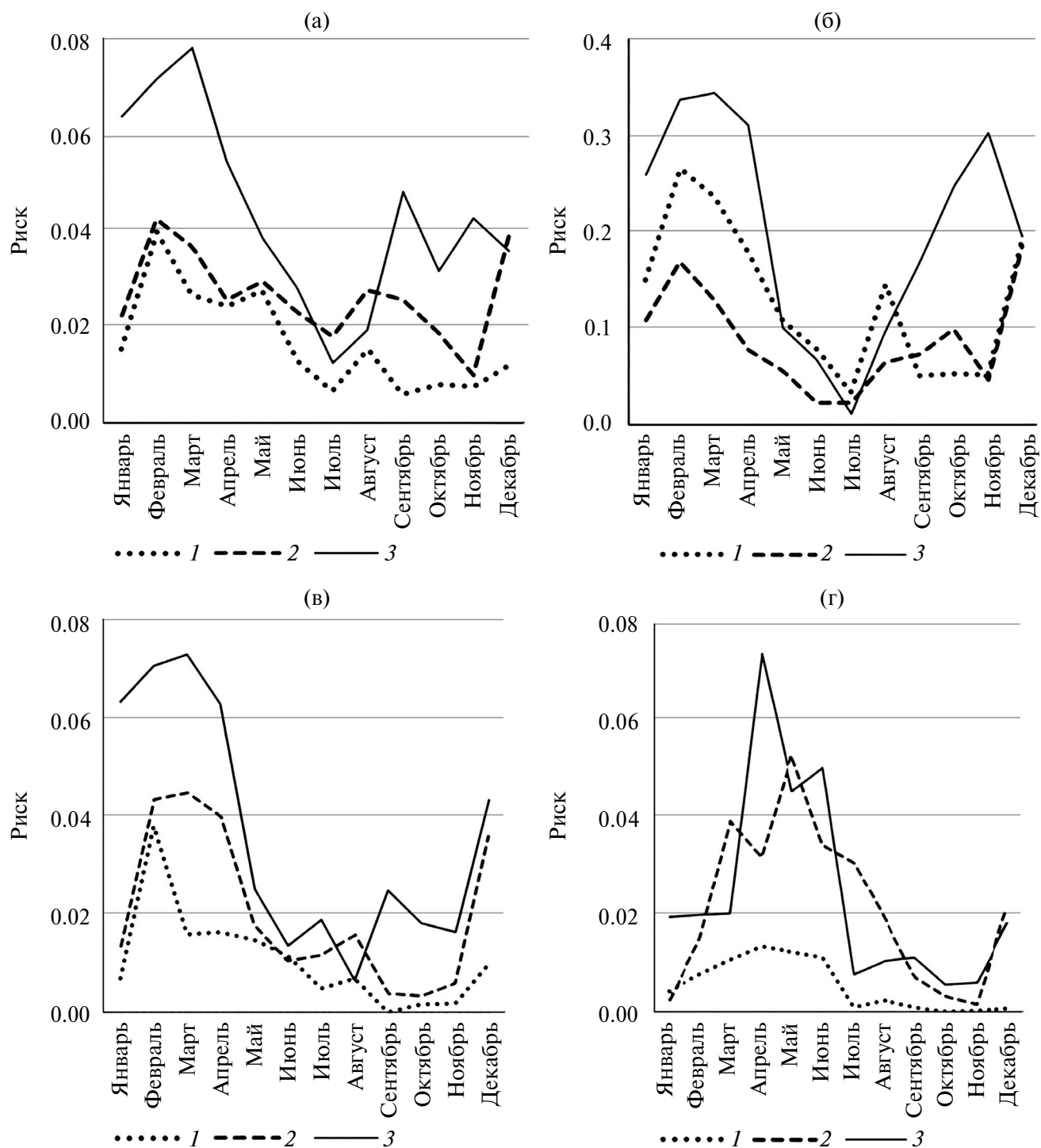


Рис. 4. Сезонные вариации риска превышения ПДК диоксида азота на АСМ: (1) № 4; (2) № 24; (3) № 3: (а) по логнормальным моделям распределения разовых концентраций для $\text{ПДК}_p = 0.085 \text{ мг/м}^3$; (б) по эмпирическим распределениям (числу событий) среднесуточных концентраций для $\text{ПДК}_{\text{ср}} = 0.04 \text{ мг/м}^3$; по логнормальным моделям распределения разовых концентраций $\text{ПДК}_p = 0.085 \text{ мг/м}^3$: в период утреннего максимума транспортной активности 7:40–10:40 (в); в период ночного минимума транспортной активности 3:00–6:00 (г).

Погрешности аппроксимации будут коррелировать с величиной рисков — для АСМ, где средние концентрации близки к ПДК (риски относительно высокие), они будут невелики, в противном случае они будут заметно выше (см. табл. 3, 4 графы ε_N , ε_{LN}). Сравнение рисков, рассчитанных по эмпирическому распределе-

нию (числу событий) (см. рис 4 (1)), с рисками по гауссовой и логнормальной моделям распределения (рис. 5) показало, что, как и ожидалось, наименьшие расхождения дает использование логнормальной модели, для ПДК по ГН 2.1.6.3492-17 они не превышают 30%.

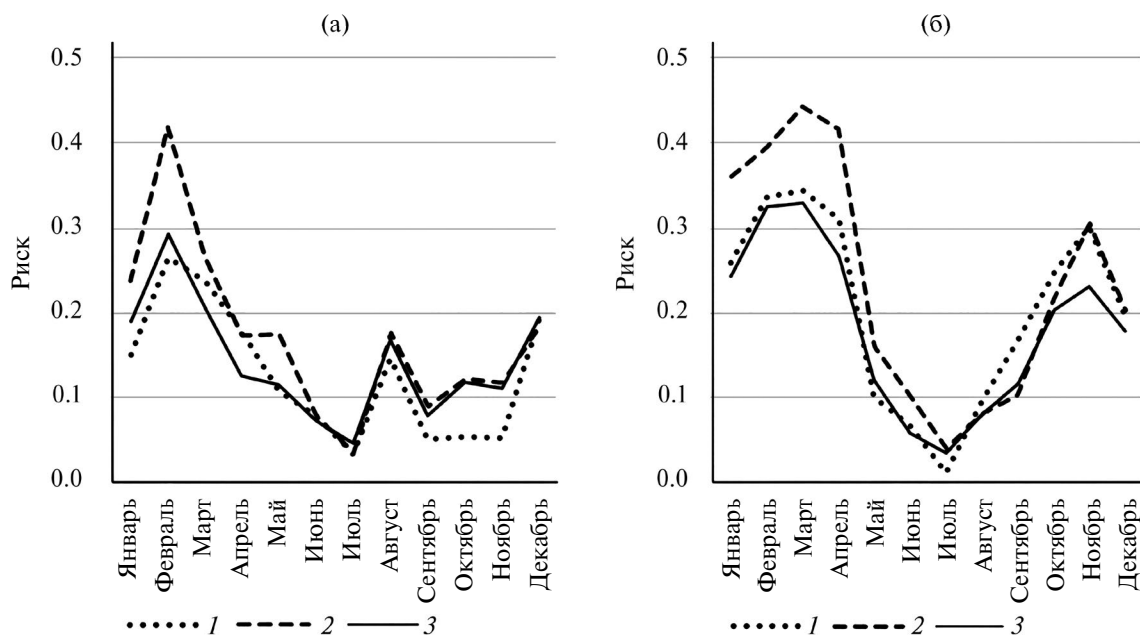


Рис. 5. Сезонные вариации риска на АСМ № 4 (а) и АСМ № 3 (б) превышения ПДК (0.04 мг/м³ по ГН 2.1.6.3492-17) диоксида азота по различным моделям распределения среднесуточных концентраций: 1 — по эмпирическому распределению (числу событий); 2 — по гауссовой модели; 3 — по логнормальной модели.

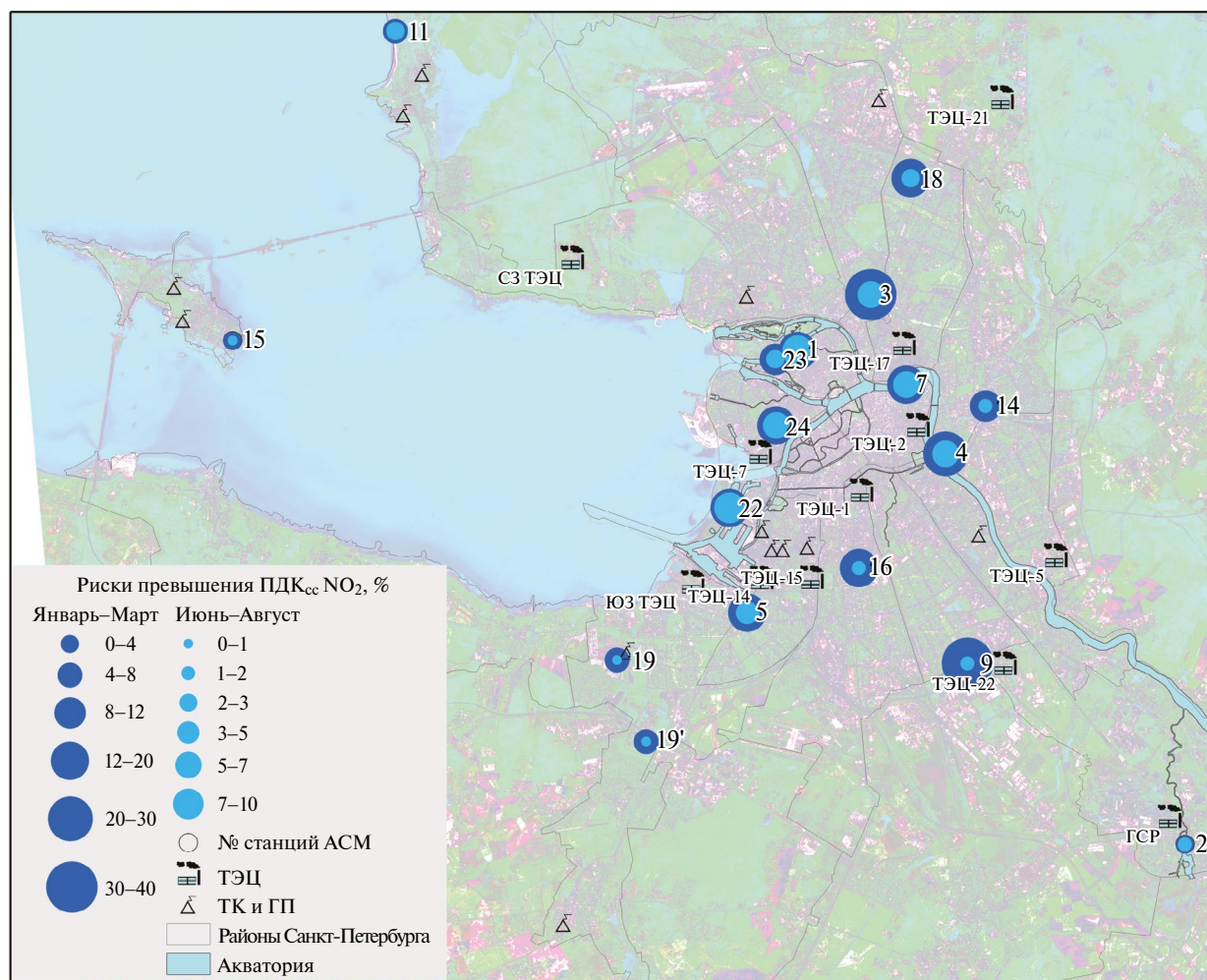


Рис. 6. Риски превышения ПДК_{сс} (0.04 мг/м³ по ГН 2.1.6.3492-17, %) на АСМ Санкт-Петербурга, оцененные на основе логнормальной модели в январе–марте и июне–августе, и основные стационарные источники эмиссии NO₂ — теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), водогрейные котельные и другие “горячие” производства (ТК и ГП).

ВЫВОДЫ

По результатам анализа пространственно-временных закономерностей распределения концентраций диоксида азота в приземной атмосфере Санкт-Петербурга в 2019–2021 гг. можно сделать следующие выводы.

— Повышенные средние годовые концентрации NO_2 и риски превышения среднесуточных ПДК не связаны с расстояниями до ближайших потенциальных источников двуокиси азота. Пониженные концентрации и риски тяготеют к окраинам Санкт-Петербурга.

— Распределения концентраций асимметричны. Их наилучшим приближением, согласно критерию асимметрии, является логнормальная модель.

— Временные вариации концентраций NO_2 определяются взаимодействием нескольких квазипериодических процессов: сезонными и суточными вариациями интенсивности выбросов при сжигании топлива на объектах ТЭК, плотности транспортных потоков, солнечной радиации и интенсивности метеорологических явлений, что отражается с одной стороны на суточных и сезонных вариациях рисков превышения ПДК, а с другой стороны определяют асимметрию и эксцентричность распределений.

— Риски превышения разовых предельно допустимой концентрация диоксида азота (по СанПин 1.2.3685-21) оказались в пределах 0.0–0.25%, то есть относятся к рискам редких событий, временные вариации которых, как правило, закономерно. Риски превышения разовых ПДК по ГН 2.1.6.3492-17 находятся в пределах первых процентов и закономерно варьируют во времени.

— Риски превышения среднесуточных ПДК (по СанПин 1.2.3685-21) оказались в пределах 0.0–1.1%, то есть относятся скорее к рискам редких событий, временные вариации которых, как правило, закономерно. Риски превышения разовых ПДК по ГН 2.1.6.3492-17 ($\text{ПДК}_{\text{с.с.}} = 0.04 \text{ мг/м}^3$) достигают 25% и закономерно варьируют во времени.

— Погрешности оценок рисков зависят от погрешностей аппроксимации эмпирического распределения той или иной математической модели. Логнормальная модель представляется наиболее удовлетворительной. При оценивании риска по ее параметрам обеспечивается относительная погрешность в пределах 30%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации “Разработка методов мониторинга здоровья экосистем Северо-Запада России” (FFZF-2025-0018).

FUNDING

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation “Development of Methods for Monitoring the Health of Ecosystems in the North-West of Russia” (FFZF-2025-0018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В. Воздух городов и его изменения. СПб.: Астерион, 2008. 254 с.
- Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. 2018.
<https://docs.cntd.ru/document/556185926?marker=6520IM>
- Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 92–108.
- Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 39–51.
- Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Ракитин В.С., Пономарев Н.А., Вережкин Я.М. Недельный цикл содержания загрязняющих примесей в приземном воздухе г. Москвы // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 10. С. 829–836.
- Ионов Д.В., Поберовский А.В. Изменчивость содержания окислов азота в приземном слое атмосферы по данным наблюдений в Петергофе // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 73–81.
- Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А. Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6. С. 1–10.
- Нормативы удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок. М., 2013. 31 с.
https://vti.ru/files/public/uchebno-metod_posobie-k_soglasheniyu_0665.pdf
- Санитарные правила и нормы СанПин 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. Утв. Постановлением Главного гос. санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2 (ред. от 30.12.2022)
https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375839/fa69e15a74de57cbe09d347462434c11fcfeeaca/
- Силаева П.Ю., Силаев А.В. Особенности рассеивания выбросов диоксида азота предприятиями энергокомплекса и их влияние на население мегаполисов // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Серия:

- Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 1. С. 63–72.
<https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72>
- Таймаров М.А., Кувшинов Н.Е., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г. Исследование химических процессов образования оксидов азота при сжигании газа и мазута // Вестн. Казанского технологического ун-та. 2016. Т. 19. № 20. С. 80–83.
- Тронин А.А., Киселёв А.В., Крицук С.Г. Многолетние тренды содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 259–265.
- Тронин А.А., Седеева М.С., Неробелов Г.М., Васильев М.П. Мониторинг содержания диоксида азота в атмосфере городов Европы и России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 287–297.
- Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast).
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881>
- Nerobelov G., Virolainen Y., Ionov D., Polyakov A., Rozanov E. WRF-Chem Modeling of Tropospheric Ozone in the Coastal Cities of the Gulf of Finland // Atmosphere. 2024. Vol. 15. № 775. 35 p.
<https://doi.org/10.3390/atmos15070775>
- Sportisse B. Fundamentals in Air Pollution. Springer Science+Business Media B.V. 2010.
<https://doi.org/10.1007/978-90-481-2970-6>
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: from pollution to climate change. 3rd ed. Wiley & Soins Inc., 2016. 1152 p.

Statistical Distributions of Nitrogen Dioxide Concentrations in the Surface Atmosphere of St. Petersburg

S. G. Kritsuk^{a, b}, I. Sh. Latypov^{a, b}, V. I. Gornya^{a, b}, A. A. Tronin^{a, b}, M. P. Vasilyev^{a, b, *},
 G. M. Nerobelov^{a, b}, and I. A. Serebritsky^c

^aSt. Petersburg Research Center for Environmental Safety of the Russian Academy of Sciences (RRCES RAS),
 St. Petersburg, Russia

^bSt. Petersburg Federal Center of the Russian Academy of Sciences (SPB FRC RAS), St. Petersburg, Russia

^cCommittee on Nature Management, Environmental Protection, and Environmental Safety,
 St. Petersburg Administration, St. Petersburg, Russia

*e-mail: mih.vasilev@mail.ru

This article presents the results of an assessment of the risks of exceeding maximum permissible concentrations of nitrogen dioxide in the atmospheric air of St. Petersburg based on measurement data from 16 automatic monitoring stations in 2019–2021 and their dependence on time of day and season. Nitrogen dioxide is a highly toxic substance and belongs to hazard class II. This necessitates taking into account the distribution of nitrogen dioxide concentrations in urban spatial planning. The study revealed that variations in NO₂ concentrations are determined by the interaction of several quasi-periodic processes: seasonal and diurnal variations in traffic density, changes in solar radiation intensity and associated photochemical reactions involving nitrogen dioxide, and the intensity of meteorological phenomena. The statistical distributions of NO₂ concentrations are asymmetric, and the lognormal model is the preferred approximation. The risks of exceeding the average daily threshold limit value (TLV) of nitrogen dioxide (according to Sanitary Regulations and Standards 1.2.3685-21) are in the range of 0.0–1.1%, and when using the TLV recommended by the WHO, in the range of 3–20%. The approach to assessing the risks of exceeding the TLV for nitrogen dioxide concentrations presented in this article can also be applied to analyzing the concentrations of other ecotoxicants that negatively impact public health or disrupt the urban environment.

Keywords: nitrogen dioxide, statistical distributions, St. Petersburg, normal distribution, lognormal distribution, risk of exceeding the TLV

REFERENCES

- Bezuglaya E.Yu., Smirnova I.V. *Vozdukh gorodov i ego izmeneniya* [Urban Air and Its Changes]. St. Petersburg: Asterion Publ., 2008. 254 p.
- Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast). Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881> (accessed: 01.11.2025).
- Elansky N.F., Lokoshchenko M.A., Trifanova A.V., Belikov I.B., Kkorokhod A.I. On contents of trace gases in the atmospheric surface layer over Moscow. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 30–41.
<https://doi.org/10.1134/S000143381501003X>

- Elansky N.F., Shilkin A.V., Ponomarev N.A., Zakharova P.V., Kachko M.D., Poliakov T.I. Spatiotemporal variations in the content of pollutants in the Moscow Air Basin and their emissions. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2022, vol. 58, pp. 80–94.
<https://doi.org/10.1134/S0001433822010029>
- Elansky N.F., Shilkin A.V., Semutnikova E.G., Zaharova P.V., Rakitin V.S., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M. Weekly cycle of pollutant concentrations in near-surface air over Moscow. *Atmos. Ocean. Opt.*, 2019, vol. 32, pp. 85–93.
<https://doi.org/10.1134/S1024856019010068>
- Gigienicheskie normativy GN 2.1.6.3492-17. Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh gorodskikh i sel'skikh poselenii [Hygienic Standards GN 2.1.6.3492-17. Maximum Permissible Concentrations (MPC) of Pollutants in the Atmospheric Air of Urban and Rural Settlements]. 2018. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/556185926?marker=65201M> (accessed: 01.11.2025). (In Russ.).
- Ionov D.V., Poberovskii A.V. Variability of Nitrogen Oxides in the Atmospheric Surface Layer near Saint Petersburg. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 720–726.
<https://doi.org/10.3103/s1068373920100064>
- Lokoshchenko M.A., Bogdanovich A.Yu., Elansky N.F., Lezina E.A. Thermal inversions and their influence on the composition of the surface air layer over Moscow. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2021, vol. 57, pp. 559–567.
<https://doi.org/10.1134/S0001433821060086>
- Nerobelov G., Virolainen Y., Ionov D., Polyakov A., Rozanov E. WRF-Chem modeling of tropospheric ozone in the coastal cities of the Gulf of Finland. *Atmosphere*, 2024, vol. 15, no. 7, art. 775.
<https://doi.org/10.3390/atmos15070775>
- Normativy udel'nykh vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu ot kotel'nykh ustanovok [Standards for Specific Emissions of Pollutants into the Atmosphere from Boiler Plants]. Moscow, 2013. 31 p.
- Sanitary rules and regulations SANPIN 1.2.3685-21 “Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans”. Approved by Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021, no. 2 (as amended on December 30, 2022). (In Russ.).
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric chemistry and physics: from pollution to climate change*. Wiley&Sons, 2016. 1152 p.
- Silaeva P.Yu., Silaev A.V. Peculiarities of dispersion of nitrogen dioxide emissions by the energy complex enterprises and their impact on the population of megapolises. *Vestn. RUDN. Ser.: Ekol. Bezopasn. Zhiznedeystv.*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 63–72. (In Russ.).
<https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-1-63-72>
- Sportisse B. *Fundamentals in Air Pollution*. Springer Science+Business Media B.V, 2010.
<https://doi.org/1007/978-90-481-2970-6>
- Taimarov M.A., Kuvshinov N.E., Akhmetova R.V., Sungatullin R.G. Study of chemical processes of the formation of nitrogen oxides during the combustion of gas and fuel oil. *Vestn. Kazan. Tekhnolog. Univ.*, 2016, vol. 19, no. 20, pp. 80–83. (In Russ.).
- Tronin A.A., Kiselyov A.V., Kritsuk S.G. Estimation of multiyear changes in nitrogen oxide concentrations over Russia from satellite measurements. *Sovr. Probl. Dist. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 259–265. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-259-265>
- Tronin A.A., Sedeeva M.S., Nerobelov G.M., Vasiliev M.P. Monitoring of nitrogen dioxide content in the atmosphere of cities in Europe and Russia using satellite data. *Sovr. Probl. Dist. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 287–297. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-287-297>