

## РАЗДЕЛ 2.

### ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 504.3.054

#### ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO<sub>2</sub>) В АТМОСФЕРЕ НАД КРЫМСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ В ПЕРИОД 2019–2023 ГГ.

*Дрыгваль А. В.<sup>1</sup>, Дрыгваль П. В.<sup>2</sup>, Табуницик В. А.<sup>3</sup>*

<sup>1,2,3</sup>*Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал  
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», Феодосия,  
Курортное, Российская Федерация*

<sup>1,3</sup>*ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,  
Севастополь, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*ФГУП НТЦ Радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России, г. Москва,  
Российская Федерация*

*E-mail: <sup>1</sup>drygva195@mail.ru*

В статье проведена оценка содержания диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосфере над Крымским полуостровом в период 2019–2023 гг. В качестве фоновых значений были взяты концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) над ООПТ в пределах разных ландшафтных уровней. Используя метод z-анализа (метод расчета стандартизированных аномалий), получены 4 уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота (NO<sub>2</sub>): условно низкий уровень загрязнения ( $z < 1$ ), условно средний уровень загрязнения ( $1 < z < 2$ ), условно повышенный уровень загрязнения ( $2 < z < 3$ ) и условно высокий уровень загрязнения ( $z > 3$ ). На основе этих условных уровней загрязнения воздуха были классифицированы данные о концентрации рассматриваемого атмосферного газа, полученные от спутников, и построены карты пространственного распределения отклонений от фоновых значений концентраций диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосферном воздухе над Крымским полуостровом в период 2019–2023 гг. Выявлено, что в пределах низкогорного ландшафтного уровня северного макросклона и плакорного ландшафтного уровня наблюдаются наибольшие зоны распространения условно высокого уровня загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) за весь рассматриваемый период (2019–2023 гг.)

**Ключевые слова:** диоксид азота (NO<sub>2</sub>), атмосферный воздух, фоновые значения концентраций, ООПТ, уровни загрязнения воздуха, спутниковые данные, z-анализ, стандартизированная оценка, ландшафтные уровни, Крымский полуостров.

#### ВВЕДЕНИЕ

Оксиды азота (NO<sub>2</sub> и NO) — это важные компоненты земной атмосферы, присутствующие как в тропосфере, так и в стратосфере. Диоксид азота (NO<sub>2</sub>) играет значимую роль в качестве предшественника антропогенного озона и является основным фактором образования различных соединений в воздухе, таких как азотная кислота, аэрозольные частицы, пероксиацетилнитрат, нитрозамины и нитрополициклические ароматические углеводороды [1].

Оксиды азота в атмосфере имеют два основных источника образования: природный и антропогенный. Природные оксиды азота образуются в результате электрических разрядов (грозовых) [2], при которых образуется монооксид азота

(NO), который затем окисляется до диоксида азота (NO<sub>2</sub>). В небольших количествах NO<sub>2</sub> также может выделяться при разложении растительных остатков микроорганизмами. Также небольшое количество закиси азота (N<sub>2</sub>O) выделяется из азотсодержащих соединений в почве [3].

Основным источником антропогенных выбросов оксидов азота (в основном NO) является сжигание топлива при высоких температурах (выше 1000°C) [4, 5]. Некоторые отрасли химической промышленности (производство взрывчатых веществ [6], удобрений [7], обработка металлов [8]) также выделяют монооксид азота (NO), но главным источником выбросов NO является автомобильный транспорт [9].

Закись азота (N<sub>2</sub>O) сохраняется в атмосфере на протяжении десятилетий [10]. В стратосфере это вещество вступает в реакцию с атомарным кислородом (O) и гидроксильными радикалами (OH), образуя монооксид азота (NO). Разрушительное воздействие монооксида азота (NO) наиболее заметно на высотах 20-30 километров. Диоксид азота (NO<sub>2</sub>) в свою очередь является одним из основных загрязнителей атмосферы, образуясь за счет фотохимических реакций оксидов в атмосфере. Данный загрязнитель способен вызывать смог, кислотные дожди, а также негативно влияет на организм человека (мишень – органы дыхательной системы).

В настоящем исследовании диоксид азота (NO<sub>2</sub>) используется как общий показатель концентрации оксидов азота, потому что в течение дня под воздействием солнечного света монооксид азота (NO) и диоксид азота (NO<sub>2</sub>) постоянно переходят из одной формы в другую в результате фотохимических реакций с участием озона (O<sub>3</sub>). Этот процесс происходит за несколько минут [1].

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Спутниковые данные.** В работе использовались спутниковые снимки набора данных Sentinel-5P OFFL NO<sub>2</sub>: Offline Nitrogen Dioxide [1], полученные через облачную платформу для геопространственного анализа данных Google Earth Engine [14] по шагам, описанным в статьях Табунчика и др. [11, 12]. В этом наборе данных представлены автономные снимки высокого разрешения концентраций NO<sub>2</sub>. Они имеют следующее временное покрытие: с 28 июня 2018 года по настоящее время, а также разрешение 1° x 1°. В работе используются среднегодовые данные концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в период 2019–2023 гг.

Прибор TROPOMI на спутнике Sentinel-5 Precursor, с помощью которого получены данные о концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосфере, извлекает продукты тропосферного и стратосферного столба диоксида азота (NO<sub>2</sub>) [1]. Также для настоящего исследования использовались данные из канала (Band) NO<sub>2</sub>\_column\_number\_density. Количественные данные измеряются в моль/м<sup>2</sup>. Данные в этом канале представляют собой концентрацию диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в общем вертикальном столбе (отношение плотности диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в столбе и общего коэффициента массы воздуха).

Визуализация спутниковых данных и построение карт производилось с использованием программного комплекса ArcGIS 10.2.

**ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO<sub>2</sub>) В АТМОСФЕРЕ НАД  
КРЫМСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ В ПЕРИОД 2019–2023 ГГ.**

**Фоновые значения концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>).** Для проведения анализа отклонений от фоновых значений концентраций диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосфере над Крымским полуостровом в качестве фоновых территорий использовались ООПТ представленные в табл. 1.

Таблица 1.

Характеристики особо охраняемых природных территорий (ООПТ)

<b>Наименование ООПТ</b>	<b>Ландшафтный уровень (по ландшафтной карте Г.Е. Гришанкова) [13]</b>	<b>Площадь, га</b>	<b>Местоположение</b>	<b>Примечание</b>
Природный парк «Калиновский»	Гидроморфный	12000 (включая акваторию озеро Сиваш )	Природный парк расположен на территории Джанкойского района Республики Крым. Ближайший населенный пункт — с. Прозрачное Джанкойского района.	ООПТ регионального значения
Карадагский природный заповедник	Низкогорный южного макросклона	2874,2 (с акваторией)	Ближайший населенный пункт к заповеднику — г. Феодосия, посёлок городского типа Курортное	ООПТ федерального значения
Природный парк «Белая скала»	Низкогорный северного макросклона	2260	Ближайший населенный пункт к участку степи — г. Белогорск	ООПТ регионального значения
Природный парк «Тарханкутский»	Плакорный	10900	Природный парк расположен на территории Черноморского района Республики Крым	ООПТ регионального значения
Национальный парк «Крымский»	Среднегорный	34563,5	Национальный парк расположен на территориях муниципальных образований Республики Крым: Бахчисарайский, Симферопольский муниципальные районы, городские округа Алушта и Ялта	ООПТ федерального значения

Составлено авторами.

Среднегодовые значения концентраций диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) над этими территориями (табл. 2) будут являться фоновыми. Территории выбранных ООПТ, как фоновых в пределах ландшафтных уровней Крымского полуострова представлены на рис. 1.

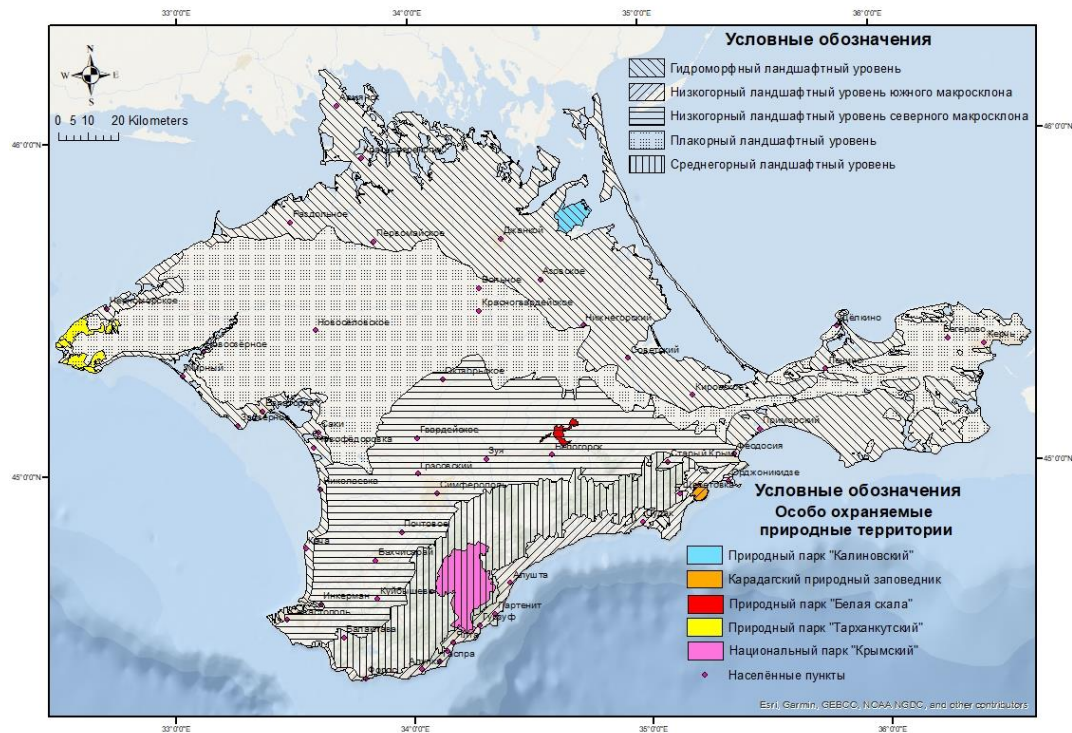


Рис. 1. Особо охраняемые природные территории (фоновые территории) в пределах ландшафтных уровней Крымского полуострова

Составлено авторами.

Для проведения анализа отклонений от фоновых значений концентраций диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) была применена стандартизированная оценка (или z-анализ) значений концентраций рассматриваемого вещества в воздухе. Z-стандартизированная величина ряда данных.

Стандартизированная оценка (z-оценка, англ.: Standard score, z-score) — это мера относительного разброса, наблюдаемого или измеренного значения, которая показывает, сколько стандартных отклонений составляет его разброс относительного среднего значения. Это безразмерный статистический показатель, используемый для сравнения значений разной размерности или шкалой измерений [14].

В качестве оцениваемых выборок данных в настоящей работе выступают выборки со значением концентрации в воздухе над ООПТ, потому что именно они

**ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO<sub>2</sub>) В АТМОСФЕРЕ НАД  
КРЫМСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ В ПЕРИОД 2019–2023 ГГ.**

используются в качестве фоновых значений. Стандартизированная оценка проводилась для каждого ООПТ за каждый рассматриваемый год: с 2019 по 2023 гг.

Для расчета стандартизированных значений  $z$  необходимы:

- переменные (случайные величины), которые и составляют саму выборку ( $x_i$ );
- среднее значение (математическое ожидание), которое вычисляется как среднее арифметическое число из ряда данных выборки ( $\bar{x}$ );
- стандартное (среднеквадратичное) отклонение для рассматриваемой выборки данных ( $\sigma$ ).

Таблица 2.

Среднегодовые значения концентраций диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосфере над  
выбранными ООПТ Крымского полуострова с 2019 по 2023 гг.

Год	Природный парк «Калиновский»	Карадагский природный заповедник	Природный парк «Белая скала»	Природный парк «Тарханкутский»	Национальный парк «Крымский»
моль/м <sup>3</sup> * 10 <sup>-5</sup>					
<b>2019</b>	6,879	6,622	6,887	6,638	6,500
<b>2020</b>	6,648	6,245	6,469	6,262	6,096
<b>2021</b>	7,007	6,678	6,899	6,699	6,617
<b>2022</b>	6,914	6,672	6,924	6,726	6,541
<b>2023</b>	7,398	7,252	7,439	7,079	7,149

Составлено авторами.

Все эти переменные при использовании формулы (1) приводят значения к стандартизированной безразмерной величине ( $z$ ):

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

Так как каждому значению концентрации соответствует свое  $z$ -значение, необходимо определить именно пределы концентраций диоксида азота (NO<sub>2</sub>), соответствующие значениям  $z=1$ ,  $z=2$  и  $z=3$ , чтобы в соответствии с ними визуализировать отклонение концентрации в ландшафтном уровне относительно фонового значения в ООПТ.

Для проведения  $z$ -анализа выборки данных должны соответствовать следующим условиям:

- более 30 значений в выборке;
- нормальное (Гауссовское) распределение значений;

Все рассматриваемые нами выборки соответствуют этим условиям.

Предлагается распределять полученные стандартизированные значения по следующим 4 интервалам относительно фоновых значений концентраций и придать им качественные характеристики:

- условно низкий уровень загрязнения ( $z < 1$ );
- условно средний уровень загрязнения ( $1 < z < 2$ ):  $\bar{x} + 1\sigma$ ;

- условно повышенный уровень загрязнения ( $2 < z < 3$ ):  $\bar{x} + 2\sigma$ ;
- условно высокий уровень загрязнения ( $z > 3$ ):  $\bar{x} + 3\sigma$ .

Характеристику «условно» принимаем, поскольку для каждого отдельно рассматриваемого года и для каждого ландшафтного уровня принимаются концентрации как фоновые в пределах выбранных контуров ООПТ, относительно которых выстраиваются качественные характеристики загрязнения атмосферного воздуха. Однако, нельзя утверждать, что уровни загрязнения воздуха: низкие, средние, повышенные или высокие. Они являются таковыми, только при выбранных условиях или относительно концентраций в пределах выбранных контуров ООПТ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием космических снимков из набора данных Sentinel-5P OFFL NO<sub>2</sub>: Offline Nitrogen Dioxide [1], полученные через облачную платформу для геопространственного анализа данных Google Earth Engine [15 в статьях Табунщика и др. [11, 12] построены карты полей среднегодовых концентраций диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосфере над Крымским полуостровом и отдельно над ландшафтными уровнями Крымского полуострова по ландшафтной карте Г.Е. Гришанкова [13] с 2019 по 2023 гг. Карты были построены с помощью программного обеспечения ArcGIS 10.5. (Рис. 2)

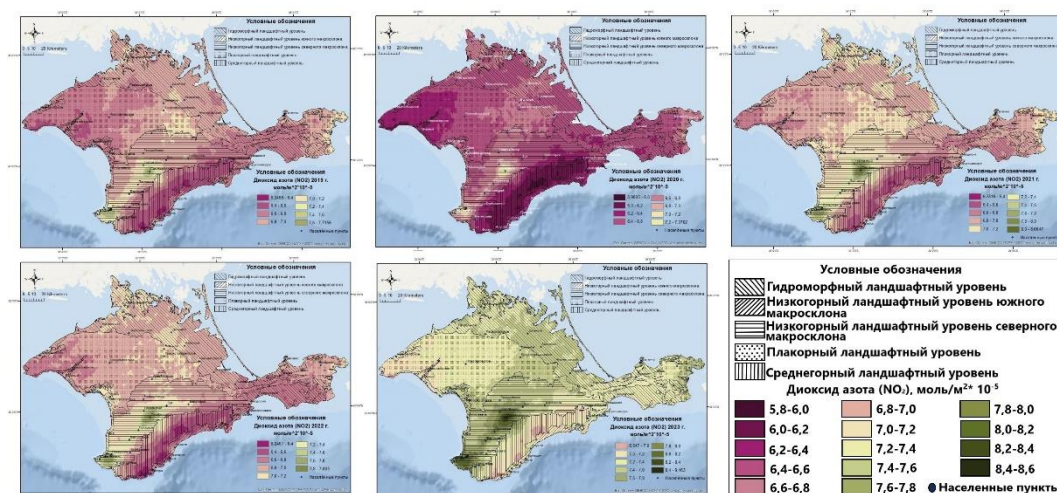


Рис. 2. Распределение концентраций диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосфере над Крымским полуостровом в период с 2019–2023 гг.

В табл. 3 представлены статистические данные о концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосфере над Крымским полуостровом. Данные в табл. 3 включают крайние значения амплитуды (минимальное и максимальное значения концентрации), амплитуда значений (разность между максимальным и

**ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO<sub>2</sub>) В АТМОСФЕРЕ НАД  
КРЫМСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ В ПЕРИОД 2019–2023 ГГ.**

минимальным значениями концентрации), среднее арифметическое значение концентраций, стандартное отклонение значений концентрации в пределах территориальных единиц в период с 2019 по 2023 гг.

Таблица 3.

Статистические данные о концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосфере над  
Крымским полуостровом с 2019 по 2023 гг.

Год	Мин. значение концентрации, моль/м <sup>2</sup> *10 <sup>-5</sup>	Мак. значение концентрации, моль/м <sup>2</sup> *10 <sup>-5</sup>	Амплитуда значений, моль/ м <sup>2</sup> *10 <sup>-5</sup>	Среднее арифм. значение, моль/ м <sup>2</sup> *10 <sup>-5</sup>	Станд. откл., моль/ м <sup>2</sup> *10 <sup>-6</sup>
1	2	3	4	5	6
<b>Крымский полуостров</b>					
<b>2019</b>	6,247	7,716	1,469	6,815	1,730
<b>2020</b>	5,909	7,370	1,462	6,491	1,843
<b>2021</b>	6,352	8,065	1,713	6,934	1,987
<b>2022</b>	6,247	7,885	1,638	6,899	1,932
<b>2023</b>	6,847	8,463	1,616	7,379	1,798
<b>Гидроморфный ландшафтный уровень (по ландшафтной карте Г.Е. Гришанкова) [13]</b>					
<b>2019</b>	6,533	7,516	0,984	6,853	1,035
<b>2020</b>	6,066	7,127	1,061	6,550	1,051
<b>2021</b>	6,619	7,682	1,064	6,952	1,267
<b>2022</b>	6,561	7,684	1,123	6,919	1,315
<b>2023</b>	6,947	8,248	1,300	7,391	1,083
<b>Низкогорный ландшафтный уровень южного макросклона (по ландшафтной карте Г.Е. Гришанкова) [13]</b>					
<b>2019</b>	6,314	7,174	0,860	6,604	1,146
<b>2020</b>	5,936	6,662	0,726	6,252	1,125
<b>2021</b>	6,383	7,306	0,924	6,665	1,203
<b>2022</b>	6,276	7,200	0,925	6,616	1,296
<b>2023</b>	6,862	7,769	0,906	7,190	1,228
<b>Низкогорный ландшафтный уровень северного макросклона (по ландшафтной карте Г.Е. Гришанкова) [13]</b>					
<b>2019</b>	6,4665	7,7156	1,2491	6,9372	1,902
<b>2020</b>	6,0383	7,3702	1,3319	6,5795	1,977
<b>2021</b>	6,4698	8,0647	1,5949	7,0905	2,412
<b>2022</b>	6,5268	7,885	1,3582	7,0423	2,215
<b>2023</b>	7,0777	8,463	1,3853	7,5427	2,231
<b>Плакорный ландшафтный уровень (по ландшафтной карте Г.Е. Гришанкова) [13]</b>					
<b>2019</b>	6,525	7,215	0,691	6,786	1,320
<b>2020</b>	6,102	6,854	0,752	6,494	1,247

Продолжение таблицы 3.

1	2	3	4	5	6
2021	6,603	7,200	0,597	6,920	1,087
2022	6,561	7,134	0,573	6,892	0,961
2023	6,955	7,648	0,694	7,336	1,115
<b>Среднегорный ландшафтный уровень (по ландшафтной карте Г.Е. Гришанкова) [13]</b>					
2019	6,247	7,267	1,021	6,596	1,676
2020	5,909	6,794	0,886	6,179	1,515
2021	6,352	7,604	1,253	6,690	2,066
2022	6,247	7,462	1,215	6,643	2,124
2023	6,847	8,008	1,161	7,214	1,835

Составлено авторами.

Максимальные концентрации диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) наблюдаются в 2023 г. (минимальная концентрация равна  $6,847 \text{ моль/м}^2 \cdot 10^{-5}$ , а максимальная —  $8,463 \text{ моль/м}^2 \cdot 10^{-5}$ ). В 2020 г. показано наименьшее количество диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) в атмосфере над Крымским полуостровом (минимальная концентрация равна  $5,909 \text{ моль/м}^2 \cdot 10^{-5}$ , максимальная составляет  $7,370 \text{ моль/м}^2 \cdot 10^{-5}$ ).

Самые высокие концентрации диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) на протяжении всего рассматриваемого периода с 2019 по 2023 гг. фиксируются в пределах низкогорного ландшафтного уровня северного макросклона в районе автотрассы от г. Симферополь до г. Севастополь. Самые низкие концентрации диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) фиксируются в пределах среднегорного ландшафтного уровня, над внутренней грядой Крымских гор.

В общем виде наибольшие концентрации диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) в атмосферном воздухе Крымского полуострова в период 2019–2023 гг. ориентируются в направлении от юго-запада на северо-восток, а также в районах г. Красноперекоск, г. Щёлкино и в восточной части Керченского полуострова.

В табл. 4 представлены рассчитанные пределы концентраций диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ), соответствующие значениям  $z=1$ ,  $z=2$  и  $z=3$  на фоновых территориях.

Таблица 4.

Пределы концентраций диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) на ООПТ

<b>Природный парк «Калиновский» (гидроморфный ландшафтный уровень), <math>\text{моль/м}^2 \cdot 10^{-5}</math></b>			
год	Z=1	Z=2	Z=3
2019	6,931	6,984	7,037
2020	6,688	6,729	6,769
2021	7,067	7,127	7,187
2022	6,956	6,997	7,039
2023	7,441	7,483	7,525



ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO<sub>2</sub>) В АТМОСФЕРЕ НАД  
КРЫМСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ В ПЕРИОД 2019–2023 ГГ.

Продолжение таблицы 4.

<b>Карадагский природный заповедник (низкогорный ландшафтный уровень южного макросклона), моль/м<sup>2</sup>*10<sup>-5</sup></b>			
<b>год</b>	<b>Z=1</b>	<b>Z=2</b>	<b>Z=3</b>
<b>2019</b>	6,639	6,656	6,673
<b>2020</b>	6,272	6,299	6,327
<b>2021</b>	6,703	6,727	6,751
<b>2022</b>	6,686	6,701	6,715
<b>2023</b>	7,286	7,321	7,355
<b>Природный парк «Белая скала» (низкогорный ландшафтный уровень северного макросклона), моль/м<sup>2</sup>*10<sup>-5</sup></b>			
<b>год</b>	<b>Z=1</b>	<b>Z=2</b>	<b>Z=3</b>
<b>2019</b>	6,921	6,954	6,987
<b>2020</b>	6,507	6,545	6,583
<b>2021</b>	6,935	6,972	7,009
<b>2022</b>	6,963	7,001	7,040
<b>2023</b>	7,458	7,477	7,496
<b>Природный парк «Тарханкутский» (платформенный ландшафтный уровень), моль/м<sup>2</sup>*10<sup>-5</sup></b>			
<b>год</b>	<b>Z=1</b>	<b>Z=2</b>	<b>Z=3</b>
<b>2019</b>	6,692	6,745	6,799
<b>2020</b>	6,332	6,402	6,472
<b>2021</b>	6,741	6,784	6,827
<b>2022</b>	6,799	6,872	6,945
<b>2023</b>	7,140	7,201	7,262
<b>Национальный парк «Крымский» (среднегорный ландшафтный уровень), моль/м<sup>2</sup>*10<sup>-5</sup></b>			
<b>год</b>	<b>Z=1</b>	<b>Z=2</b>	<b>Z=3</b>
<b>2019</b>	6,586	6,671	6,757
<b>2020</b>	6,169	6,241	6,314
<b>2021</b>	6,715	6,814	6,912
<b>2022</b>	6,679	6,816	6,954
<b>2023</b>	7,254	7,359	7,464

Составлено авторами.

В соответствии с рассчитанными интервалами концентраций фоновых значений концентраций диоксида азота (NO<sub>2</sub>) (табл. 4) визуализируем отклонения от них в пределах всех ландшафтных уровней с 2019 по 2023 гг. Пространственное распределение отклонений от фоновых значений концентраций диоксида азота

(NO<sub>2</sub>) в атмосфере над Крымским полуостровом с 2019 по 2023 гг. представлено на рис. 3.

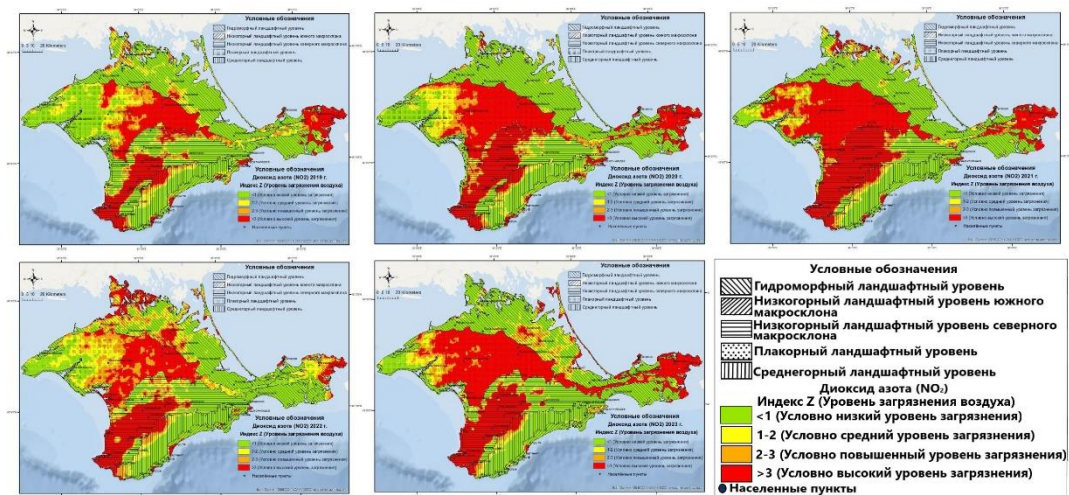


Рис. 3. Пространственное распределение отклонений от фоновых значений концентраций диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосферном воздухе над Крымским полуостровом в период 2019–2023 гг.

Составлено автором.

Над Крымским полуостровом в период 2019–2023 гг. концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосферном воздухе классифицируются в основном как условно низкий уровень загрязнения и условно высокий уровень загрязнения. Условно средний уровень загрязнения и условно повышенный уровень загрязнения имеют небольшие зоны распространения.

В пределах гидроморфного ландшафтного уровня условно высокий уровень загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) наблюдается в северной части ландшафтного уровня (2019–2022 гг.), пик распространения такого уровня загрязнения приходится на 2022 г. В 2023 г. условно высокий уровень загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) фиксируется на Арабатской стрелке. Также такой уровень загрязнения фиксируется в 2019 г. южнее г. Джанкой и в 2022 г. и 2023 г. в районах г. Джанкой и п. Азовское.

Низкогорный ландшафтный уровень южного макросклона характеризуется небольшими зонами распространения условно высокого уровня загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) в районах п. Форос, п. Гаспра, г. Ялта, г. Алушта, г. Судак и п. Орджоникидзе. Причем, нужно отметить, что в 2023 условно высокий уровень загрязнения диоксида азота (NO<sub>2</sub>) наблюдался только в районе г. Алушта, а в районе г. Судак такой уровень загрязнения фиксировался в 2019 г., 2020 г., 2022 г. (юго-восточнее г. Судак).

В пределах низкогорного ландшафтного уровня северного макросклона условно высокий уровень загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) в период 2019–2023 гг. наблюдается практически на 1/2 доли территории ландшафтного уровня (от

## ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO<sub>2</sub>) В АТМОСФЕРЕ НАД КРЫМСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ В ПЕРИОД 2019–2023 ГГ.

г. Севастополь до г. Зуя). Также условно высокий уровень рассматриваемого газа зафиксирован в г. Белогорск. Наибольшая зона распространения условно высокого уровня зафиксирована в 2020 и 2021 гг. Распространение условно высокого уровня концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в воздухе в этой зоне обусловлено наличием дорожно-транспортной инфраструктуры.

Плакорный ландшафтный уровень характеризуется большими зонами распространения условно высокого уровня загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) в 2020 г., 2021 г. и 2023 г. В 2019 г. и 2022 г. зона этого распространения меньше, поскольку увеличилась зона распространения условно низкого уровня загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) на западе Крымского полуострова. Условно высокий уровень загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) отмечаются в пределах этого ландшафтного уровня на западной части Керченского полуострова с 2019 по 2023 гг.

Для среднегорного ландшафтного уровня характерно распространение условно высокого уровня загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) только в юго-западной его части, а также в районе г. Балаклава.

Несмотря на тенденцию к увеличению среднегодовой концентрации NO<sub>2</sub> над Крымским полуостровом (в среднем на 0,577 моль/м<sup>2</sup>\*10<sup>-5</sup>) за рассматриваемые 6 лет, территории, которые охватывают высокие относительные уровни загрязнения уменьшаются (за счет увеличения значений фоновых концентраций NO<sub>2</sub> над ООПТ).

### ВЫВОДЫ

За рассматриваемый период с 2019 по 2023 гг. наименьшие концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) отмечаются в 2020 г. (от 5,909 моль/м<sup>2</sup>\*10<sup>-5</sup>), и напротив, наибольшие — в 2023 г. (8,463 моль/м<sup>2</sup>\*10<sup>-5</sup>).

Самые высокие концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) на протяжении всего рассматриваемого периода с 2019 по 2023 гг. фиксируются в пределах низкогогорного ландшафтного уровня северного макросклона в районе автотрассы от г. Симферополь до г. Севастополь, а также ориентируются в направлении от юго-запада на северо-восток. Высокие концентрации зафиксированы также в районах г. Красноперекоск, г. Щёлкино и в восточной части Керченского полуострова.

Самые низкие концентрации диоксида азота (NO<sub>2</sub>) фиксируются в пределах среднегорного ландшафтного уровня, над внутренней грядой Крымских гор.

В пределах низкогогорного ландшафтного уровня северного макросклона и плакорного ландшафтного уровня наблюдаются наибольшие зоны распространения условно высокого уровня загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) за весь рассматриваемый период (2019–2023 гг.).

На распространение условно высокого уровня загрязнения диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) в пределах Крымского полуострова за рассматриваемый период влияют многие факторы, среди которых: изрезанность береговой линии, которая способствует накоплению и рассеиванию газов в атмосфере (низкогогорный ландшафтный уровень южного макросклона), плотность дорожной сети и

населенных пунктов (низкогорный ландшафтный уровень северного макросклона), общая циркуляция атмосферного воздуха, рельеф земной поверхности — внешняя и внутренняя гряды Крымских гор вносят свои коррективы в распределение и перенос атмосферных газов в пределах Крымского полуострова (среднегорный ландшафтный уровень), социальные факторы (пандемия COVID-19 и др.).

#### **БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена в рамках государственного задания Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН – филиала ФИЦ ИнБЮМ по теме «Мониторинг климатически активных веществ в наземных экосистемах Республики Крым в условиях изменения климата и антропогенного воздействия с применением дистанционных методов исследований» (№ гос. регистрации 124052000057-0).

#### **Список литературы**

1. Earth Engine Data Catalog. Sentinel-5P OFFL NO2: Offline Nitrogen Dioxide [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S5P\\_OFFL\\_L3\\_NO2#description](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_NO2#description). (дата обращения: 27.04.2024)
2. Кузнецова В.Л., Соловьева А.Г. Оксид азота: свойства, биологическая роль, механизмы действия // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 4. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21037> (дата обращения: 15.10.2024).
3. Середина В.П. Загрязнение почв: учебное пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. 346 с.
4. Пашков Л.Т. Основы теории горения. М.: МЭИ, 2002. 136 с.
5. Росляков П.В., Закиров И.А. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях. М: МЭИ, 2001. 144 с.
6. Султанов Е.В., Булушев Д.А., Акинин Н.И., Смирнов С.П. Количественное определение оксидов азота (II) в продуктах взрыва модельных промышленных составов на основе нитрата аммония // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36. № 10. С. 124–128.
7. ГОСТ Р 56828.44-2018. Наилучшие доступные технологии. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. Выбор маркерных веществ для выбросов в атмосферу от промышленных источников. М: Стандартинформ, 2018. 16 с.
8. Шабанова И.А., Ковалева С.В., Коршунов А.В. Сравнительная эффективность технологий очистки отходящих газов от оксидов азота // Инженерный вестник Дона. 2023. №5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/8428> (дата обращения: 15.10.2024).
9. Ситдикова А.А., Святова Н.В., Царева И.В. Анализ влияния выбросов автотранспорта в крупном промышленном городе на состояние загрязнения атмосферного воздуха // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19623> (дата обращения: 15.10.2024).
10. Денисова К.О., Ильин А.А., Ильин А.П., Румянцев Р.Н., Волкова А.В. Закись азота: получение, применение, защита окружающей среды // Журнал общей химии. 2019. Т. 89. №6. С. 1338–1346.
11. Tabunschik V., Gorbunov R., Gorbunova T. Unveiling Air Pollution in Crimean Mountain Rivers: Analysis of Sentinel-5 Satellite Images Using Google Earth Engine (GEE) // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. iss. 13. Art. №. 3364. 25 p.
12. Tabunschik V., Gorbunov R., Bratanov N., Gorbunova T., Mirzoeva N., Voytsekhovskaya V. Fatala River Basin (Republic of Guinea, Africa): Analysis of Current State, Air Pollution, and Anthropogenic Impact Using Geoinformatics Methods and Remote Sensing Data // Sustainability. 2023. Vol. 15. iss. 22. Art. №15798. 29 p.
13. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий / под ред. Е.А. Позаченюк. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 672 с.

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO<sub>2</sub>) В АТМОСФЕРЕ НАД  
КРЫМСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ В ПЕРИОД 2019–2023 ГГ.

---

14. РУНИВЕРСАЛИС энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://руни.рф/Z-оценка> (дата обращения: 13.07.2024).
15. Google Earth Engine. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earthengine.google.com/> (дата обращения: 27.04.2024).

**ASSESSMENT OF NITROGEN DIOXIDE (NO<sub>2</sub>) CONTENT IN THE  
ATMOSPHERE OVER THE CRIMEAN PENINSULA  
IN THE PERIOD 2019–2023**

*Drygval A. V.<sup>1</sup>, Drygval P. V.<sup>2</sup>, Tabunschik V. A.<sup>3</sup>*

*<sup>1,2,3</sup>T.I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS – Branch of A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Feodosia, Kurortnoye, Russia*

*<sup>1,3</sup>A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia*

*<sup>2</sup>FSE RTC RCSH, Moscow, Russia*

*E-mail: <sup>1</sup>[drygval95@mail.ru](mailto:drygval95@mail.ru)*

The article assesses the nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) content in the atmosphere over the Crimean Peninsula in the period 2019–2023. Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) concentrations over protected areas within different landscape levels were taken as background values. Using the z-analysis method (method of calculation of standardized anomalies), 4 levels of atmospheric air pollution by nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) were obtained: conditionally low pollution level ( $z < 1$ ), conditionally medium pollution level ( $1 < z < 2$ ), conditionally elevated pollution level ( $2 < z < 3$ ) and conditionally high pollution level ( $z > 3$ ). Based on these conditional levels of air pollution, data on the concentration of the considered atmospheric gas obtained from satellites were classified and maps of the spatial distribution of deviations from background values of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) concentrations in the atmospheric air over the Crimean Peninsula in the period 2019–2023 were constructed.

The highest concentrations of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) throughout the period under consideration from 2019 to 2023 are recorded within the low-mountain landscape level of the northern macroslope in the area of the highway from Simferopol to Sevastopol, and oriented in the direction from southwest to northeast. High concentrations were also recorded in the areas of Krasnoperekopsk, Shchylkino and in the eastern part of the Kerch Peninsula.

The lowest concentrations of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) are recorded within the mid-mountain landscape level, over the inner ridge of the Crimean Mountains.

Above the Crimean Peninsula in the period 2019–2023 nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) concentrations in the atmospheric air are classified mainly as conditionally low pollution level and conditionally high pollution level. Conditionally medium pollution level and conditionally high pollution level have small distribution zones.

It is revealed that within the low-mountain landscape level of the northern macroslope and the upland landscape level the largest zones of distribution of conditionally high level of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) pollution for the whole period under consideration (2019–2023) are observed.

**Keywords:** nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), atmospheric air, background concentration values, protected areas, air pollution levels, satellite data, z-analysis, standardized assessment, landscape levels, Crimean Peninsula.

### References

1. Earth Engine Data Catalog. Sentinel-5P OFFL NO<sub>2</sub>: Offline Nitrogen Dioxide [Electronic resource]. URL: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S5P\\_OFFL\\_L3\\_NO2#description](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_NO2#description), (дата обращения: 27.04.2024) (in English).
2. Kuznecova V.L., Soloveva A.G. Oksid azota: svoystva, biologicheskaya rol', mekhanizmy dejstviya (Nitric oxide: properties, biological role, mechanisms of action) // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015. no. 4. [Electronic resource]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21037> (дата обращения: 15.10.2024). (in Russian).
3. Seredina V.P. Zagryaznenie pochv: uchebnoe posobie (Soil contamination: textbook) Tomsk: Izdatel'skij Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta (Publ.), 2015. 346 p. (in Russian)
4. Pashkov L.T. Osnovy teorii goreniya (Basics of combustion theory). M.: MEI (Publ.), 2002. 136 p. (in Russian).
5. Roslyakov P.V., Zakirov I.A. Nestekhiometricheskoe szhiganie prirodnogo gaza i mazuta na teplovyh elektrostanciyah (Non-stoichiometric combustion of natural gas and fuel oil at thermal power plants). M.: MEI (Publ.), 2001. 144 p. (in Russian).
6. Sultanov E.V., Bulushev D.A., Akinin N.I., Smirnov S.P. Kolichestvennoe opredelenie oksidov azota (II) v produktah vzryva model'nyh promyshlennyh sostavov na osnove nitrata ammoniya (Quantitative determination of nitrogen oxides (II) in the explosion products of model industrial compositions based on ammonium nitrate) // *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii*, 2022, Vol. 36. no. 10. pp. 124–128. (in Russian).
7. GOST R 56828.44-2018. Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Proizvodstvo ammiaka, mineral'nyh udobrenij i neorganicheskikh kislot. Vybormarkernykh veshchestv dlya vybrosov v atmosferu ot promyshlennyh istochnikov (GOST P 56828.44-2018. Best available technologies. Production of ammonia, mineral fertilizers and inorganic acids. Selection of marker substances for air emissions from industrial sources.). M: Standartinform (Publ.), 2018. 16 p. (in Russian).
8. Shabanova I.A., Kovaleva S.V., Korshunov A.V. Sravnitel'naya effektivnost' tekhnologij oчитki othodyashchih gazov ot oksidov azota (Comparative efficiency of technologies for purification of waste gases from nitrogen oxides) // *Engineering Bulletin of the Don*, 2023. no. 5. [Electronic resource]. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/8428> (дата обращения: 15.10.2024) (in Russian).
9. Sitdikova A.A., Svyatova N.V., Careva I.V. Analiz vliyaniya vybrosov avtotransporta v krupnom promyshlennom gorode na sostoyanie zagryazneniya atmosfernogo vozduha (Analysis of the impact of motor transport emissions in a large industrial city on the state of atmospheric air pollution) // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 3 [Electronic resource]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19623> (дата обращения: 15.10.2024) (in Russian).
10. Denisova K.O., Il'in A.A., Ilin A.P., Romyancev R.N., Volkova A.V. Zakis' azota: poluchenie, primenenie, zashchita okruzhayushchej sredy (Nitrous oxide: production, application, environmental protection) // *Zhurnal obshchej himii*, 2019, Vol. 89, no. 6. pp. 1338–1346 (in Russian).
11. Tabunschik V., Gorbunov R., Gorbunova T. Unveiling Air Pollution in Crimean Mountain Rivers: Analysis of Sentinel-5 Satellite Images Using Google Earth Engine (GEE) // *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, iss. 13., Art. №. 3364. 25 p. (in English).
12. Tabunschik V., Gorbunov R., Bratanov N., Gorbunova T., Mirzoeva N., Voytsekhovskaya V. Fataal River Basin (Republic of Guinea, Africa): Analysis of Current State, Air Pollution, and Anthropogenic Impact Using Geoinformatics Methods and Remote Sensing Data // *Sustainability*. 2023, Vol. 15, iss. 22. Art. № 15798. 29 p. (in English).
13. *Sovremennye landshafty Kryma i sopredel'nyh akvatorij* (Modern landscapes of Crimea and adjacent water areas). E.A. Pozachenyuk. Ed. Simferopol: Biznes-Inform (Publ.), 2009. 672 p. (in Russian).

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO<sub>2</sub>) В АТМОСФЕРЕ НАД  
КРЫМСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ В ПЕРИОД 2019–2023 ГГ.

---

14. RUNIVERSALIS enciklopediya (RUNIVERSALIS encyclopedia) [Electronic resource]. URL: <https://руни.рф/Z-оценка> (дата обращения: 13.07.2024) (in Russian).
15. Google Earth Engine. [Electronic resource]. URL: <https://earthengine.google.com/> (дата обращения: 27.04.2024) (in English).

*Поступила в редакцию 30.10.2024 г.*