

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА
СЕВАСТОПОЛЬСКОГО РЕГИОНА****А.А. Егоркин**

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: egorkin1974@yandex.ru

Представлены методологические подходы к интегральной оценке качества атмосферного воздуха Севастопольского региона с использованием методов факторного анализа. Для анализа были использованы расчетные и статистические данные с 2019 по 2022 год, характеризующие исследуемый регион. Полученные результаты позволяют провести оценку состояния качества атмосферного воздуха в динамике за продолжительный период времени и предложить пути повышения эффективности экологической безопасности региона.

Ключевые слова: геоэкологическая оценка, качество атмосферного воздуха, обобщенная функция желательности, экологическая техноёмкость территории.

Поступила в редакцию: 10.05.2023.

Введение. Геоэкология как наука рассматривает пространственные закономерности процессов, происходящих на определенной территории, так как территория как структура является пространством функционирования и взаимодействия всех природных процессов и явлений.

Особое внимание заслуживает рассмотрение качества атмосферного воздуха как одного из элементов геоэкологической оценки территории.

При исследовании качества воздуха необходимо обратить внимание на то, что постепенное накопление экологических негативных изменений приземного слоя атмосферы определяется различными видами загрязнений - макрорегиональным, трансграничным и глобальным [1].

Используемые в настоящее время методики геоэкологической оценки качества окружающей среды и непосредственно атмосферного воздуха недостаточно разработаны, поскольку отдельные их аспекты существуют фрагментарно и по ним сложно осуществлять комплексную оценку состояния экологической безопасности региона.

Цель и постановка задач. Цель данной работы – разработка методоло-

гии геоэкологической оценки качества атмосферного воздуха Севастопольского региона. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу по выбору и обоснованию показателей качества атмосферного воздуха.

Материалы и методы. В рамках данной работы в качестве объекта исследования выбрана территория Севастопольского региона, который в пространственном отношении представляет собой сложную многокомпонентную совокупность объектов антропогенной и не антропогенной природы, к которым относятся: жилая застройка, промышленные объекты, прибрежная морская зона, внутренние водоёмы, зелёные зоны.

Для решения задачи проводился анализ данных, характеризующих источники негативного воздействия Севастопольского региона. Исследование уровня воздействия выполнялось на основе мониторинговых наблюдений, данных дистанционного зондирования Земли, данных инструментальных замеров вредных веществ на стационарных постах, статистических материалов по охране окружающей среды, а также результатов математического и компьютерного моде-

лирования рассеивания вредных веществ, представленных в различных международных базах данных [2].

В качестве статистических данных использовались материалы ежегодных докладов и формы 2-ТП (воздух), публикуемые на официальном сайте министерства природных ресурсов.

Спутниковые данные основывались на характеристиках, получаемых от спектрометра TROPOMI, интегрированные в приложение Google Earth Engine (GEE) [3]. Исходные данные позволили определить общее содержание в вертикальном столбе тропосферы таких химических веществ, как озон (O_3 , моль/ m^2), диоксид азота (NO_2 , моль/ m^2), диоксид серы (SO_2 , моль/ m^2), монооксид углерода (CO , моль/ m^2), метан (CH_4 , ppbV), формальдегид ($HCHO$, моль/ m^2), характерные для исследуемого региона.

В качестве данных численного моделирования для исследования были взяты результаты расчета рассеивания взвешенных веществ за 2019-2022 год, опубликованные в материалах Службы мониторинга атмосферы Copernicus (CAMS), которые основаны на совокупности одиннадцати современных численных моделей качества воздуха, разработанных в Европе [4].

После анализа исходных данных разрабатывалась совокупность частных показателей, отображающих качество состояния атмосферного воздуха. Учитывая комплексный характер воздействия различных факторов на атмосферный воздух, рассчитывался обобщенный (интегральный) показатель качества атмосферного воздуха.

Экспертным путем на основании анализа литературных источников, нормативных документов для проведения оценки качества атмосферного воздуха были выбраны следующие частные показатели:

1. Масса загрязняющих веществ, выбрасываемых всеми стационарными источниками, расположенными на территории Севастопольского региона (тонн/ за исследуемый год).

2. Масса загрязняющих веществ, выбрасываемых всеми передвижными источниками, действующими на территории Севастопольского региона (тонн/ за исследуемый год).

3. Индекс ($I_{за}$) загрязнения атмосферы отдельной примесью, учитывающий класс опасности вещества через нормирование на опасность SO_2 , рассчитанный на основе данных рассеивания загрязняющих веществ, учитывающий трансграничное и глобальное загрязнения атмосферы.

В виду отсутствия необходимого количества постов наблюдений в регионе для оценки использовались данные модельных расчетов трансграничного переноса загрязняющих веществ.

Индекс ($I_{за}$) рассчитывался с учётом опасности примесей, и их токсичности

$$I_{за} = (C_i / ПДК_{cci})^{a_i}, \quad (1)$$

где $ПДК_{cci}$ – предельно допустимая среднегодовая концентрация вещества, $мкг/м^3$ (по требованиям Всемирной организации здравоохранения); C_i – средняя годовая концентрация i -го вещества, $мкг/м^3$ (результаты использовались из базы данных [4]); a_i – коэффициент приведения степени вредности веществ к степени вредности диоксида серы (значения равны 1,5; 1,3; 1,0 и 0,85 соответственно для 1, 2, 3 и 4 классов опасности загрязняющего вещества).

4. $СИ$ – стандартный индекс, наибольшая разовая концентрация (результаты использовались из базы данных [4]) примеси в году, деленная на ПДК.

5. $НП$ – наибольшая повторяемость (в процентах) превышения максимально разовой ПДК за год.

6. Показатели качества атмосферного воздуха, полученные по данным дистанционного зондирования Земли I_T (O_3 , NO_2 , SO_2 , CO , CH_4 , $HCHO$).

7. Индикатор экологической емкости атмосферного воздуха над территорией исследования является безразмерной положительной величиной. Если его значение равно меньше единицы, то

соответственно антропогенная нагрузка превышает экологическую техноёмкость атмосферного воздуха и в случае наоборот экологическая ситуация считается нормальной. Индекс рассчитывался по формуле

$$I_{ЭТА} = ЭТА/АВ, \quad (2)$$

где ЭТА – экологическая техноёмкость атмосферы исследуемой территории, усл.т/год; АВ – масса антропогенных выбросов в атмосферу от стационарных и нестационарных источников усл.т/год.

Приближенный расчет экологической техноёмкости атмосферы, выполнялся на основе методики [5, 6]

$$ЭТА = ЭХ\tau, \quad (3)$$

где Э – экологическая емкость воздуха, т/год; Х – коэффициент вариации для естественных колебаний содержания основной субстанции в воздухе; τ – коэффициент перевода массы в условные тонны (коэффициент относительной опасности примесей).

Экологическая емкость атмосферы рассчитывалась по формуле

$$\mathcal{E} = VCF, \quad (4)$$

где V – экстенсивный параметр (зависящий от количества вещества в атмосфере, определяемый размером территории

$$V = Sh_z, \quad (5)$$

где S – площадь территории, км²; h_z – приведенная высота слоя воздуха, км, подвергающегося техногенному загрязнению (в работе использовалось значение равное 0,03 км); C – содержание главных экологически значимых субстанций в воздухе (кислорода и углекислого газа), 3×10^5 т/км³; F – скорость кратного обновления объема или массы кислорода (год⁻¹)

$$F = 55896v/\sqrt{S}, \quad (6)$$

где v – годовая средняя скорость ветра, м/с.

Значение коэффициента (X) (естественные колебания кислорода и углекислого газа в атмосферном воздухе) равно 3×10^{-6} .

При отсутствии конкретных данных о количестве и составе примесей принималось среднее значение коэффициента относительной опасности примесей (τ_i) (если в качестве эталонной примеси выбран диоксид серы) равное 0,46.

Масса антропогенных выбросов (АВ) определялась с учетом потребления кислорода основными загрязнителями и рассчитывалась по формуле [7]

$$AB = 0,571m_{CO} + 0,696m_{NO_2} + 0,5m_{SO_2}, \quad (7)$$

где АВ – годовое количество выбросов (предприятиями и транспортом), усл.тыс.т; m_{CO} , m_{NO_2} , m_{SO_2} – массы выбросов в зависимости от молярных масс для монооксида углерода - 0.571, диоксида азота - 0.696, диоксида серы - 0.5, усл.тыс.т.

По отдельным веществам объемы потребляемого кислорода суммируются, как и по передвижным и стационарным источникам загрязнения в регионе.

Оценка суммарного влияния различных факторов проводилась с применением частной функции желательности [8 – 10].

Эта функция (d) представляет собой способ перевода натуральных значений показателей в единую безразмерную числовую шкалу с фиксированными границами.

В свою очередь для обоснования значений обобщенной функции желательности принимались обоснованные границы градаций функции желательности (рассчитанные по частным функциям желательности) [11], позволяющие оценить геоэкологическую ситуацию качества атмосферного воздуха (табл. 1).

Учитывая характер частных показателей, было определено, что функция желательности должна иметь свойство убывания с возрастанием числовых значений отклика.

Таблица 1. Градации экологической ситуации по значению обобщенной функции желательности

Значения функции желательности	Характеристика экологической ситуации
1,00÷0,80	Очень хорошая
0,80÷0,63	Хорошая
0,63÷0,37	Удовлетворительная
0,37÷0,20	Плохая
0,20÷0,00	Очень плохая

Решение поставленной задачи исследования проводилось с использованием частной функции желательности Харрингтона (d), рассчитываемой для каждого частного показателя качества атмосферного воздуха, которая имеет вид [12]

$$d = \exp[-\exp(-y)], \quad (8)$$

где y – кодированное значение выбранных ранее показателей, то есть их значения в условном масштабе.

Показатели y , в свою очередь, рассчитывались по следующей формуле

$$y = 2y - (y_{\max} + y_{\min}) / y_{\max} - y_{\min}. \quad (9)$$

Значения y_{\max} и y_{\min} принимаются равными максимальным и минимальным значениям соответствующих показателей. При проведении исследования были выбраны из каждого ряда значений частных показателей по два базовых значения y_{\max} и y_{\min} , соответствующие нижней границе области желательностей «плохо» (функция желательности принимает значение менее 0,368) и соответствующее значение для верхней границы области «хорошо» (функция принимает значение 0,692).

Полученные графическим или аналитическим путем значения желательности (d) частных оценочных показателей используют при расчете обобщенного показателя (D) качества атмосферного воздуха как свертку частных функций желательности. Максимальная его величина, стремящаяся к единице, определяет лучший вариант.

Особенностью расчета комплексного (интегрального) показателя качества атмосферного воздуха является нахождение математических моделей для частных функций желательности в виде логистических кривых.

Комплексный (интегральный) показатель качества атмосферного воздуха рассчитывался по формуле

$$D = \sqrt[n]{d_1 \times d_2 \times d_n}, \quad (10)$$

где d_i – частная функция желательности, отражающая состояние различных показателей, влияющих на качество атмосферного воздуха; n – число показателей.

Полученные результаты. Выбранные ранее частные параметры были переведены в единую числовую шкалу с помощью частной функции желательности по формулам (8) и (9). По формуле (10) был проведен расчет комплексного (интегрального) показателя качества атмосферного воздуха в Севастопольском регионе за период 2019–2022 гг. Таким образом, была получена «свернутая» информация по Севастопольскому региону за 2019–2022 годы. Основные результаты расчетов приведены в (табл. 2).

Заключение. Анализируя ход исследования можно отметить следующее:

- полученные результаты (табл. 2) обобщенного показателя качества атмосферного воздуха согласно критериям (табл. 1) свидетельствуют об удовлетворительном состоянии экологического состояния атмосферного воздуха Севастопольского региона;
- применение различных методик в совокупности дало более точную оценку изучаемой территории;
- был учтен трансграничный перенос загрязняющих веществ (данные CAMS) и местная специфика региона (количество выбросов от объектов негативного воздействия региона);
- было использовано достаточно большое количество показателей качества атмосферного воздуха, что повышает достоверность полученных результатов;

Таблица 2. Основные результаты расчетов

Показатель	2019		2020		2021		2022	
	Текущие значение параметра	<i>d</i>	Текущие значение параметра	<i>d</i>	Текущие значение параметра	<i>d</i>	Текущие значение параметра	<i>d</i>
<i>D</i>	0,439		0,408		0,453		0,477	
Индекс (<i>I_{за}</i>)	4,94	0,5	6,48	0,38	5,86	0,42	5,24	0,46
<i>СИ</i> (NO ₂)	1,075	0,63	2,960	0,5	1,826	0,603	1,012	0,635
<i>СИ</i> (SO ₂)	0,404	0,692	0,332	0,692	0,442	0,664	0,363	0,664
<i>СИ</i> (CO)	0,0855	0,692	0,0764	0,692	0,0896	0,692	0,0932	0,692
<i>СИ</i> (O ₃)	3,5944	0,46	3,5962	0,46	3,7136	0,46	3,7932	0,463
<i>СИ</i> (PM _{2,5})	12,3263	0,065	9,3545	0,086	5,9412	0,31	4,8809	0,387
<i>СИ</i> (PM ₁₀)	4,7366	0,38	14,0023	0,065	3,6366	0,463	4,1211	0,425
<i>НП</i> (NO ₂)	0,18	0,692	14,56	0,536	1,92	0,664	0,27	0,692
<i>НП</i> (SO ₂)	0	0,692	0,00	0,692	0	0,692	0	0,692
<i>НП</i> (CO)	0	0,692	0,00	0,692	0	0,692	0	0,692
<i>НП</i> (O ₃)	99,90	0,065	99,17	0,065	100	0,065	100	0,065
<i>НП</i> (PM _{2,5})	64,65	0,065	92,96	0,065	87,91	0,065	72,52	0,065
<i>НП</i> (PM ₁₀)	13,35	0,536	34,06	0,235	26,09	0,348	18,13	0,463
<i>I_T</i> NO ₂	33,117	0,380	30,771	0,53	30,133	0,57	31,234	0,5
<i>I_T</i> SO ₂	488,4130	0,570	549,7852	0,53	528,8309	0,57	603,7991	0,5
<i>I_T</i> CO	0,033214	0,530	0,035317	0,46	0,036805	0,42	0,032850	0,57
<i>I_T</i> O ₃	0,143952	0,630	0,148024	0,57	0,152097	0,53	0,146525	0,6
<i>I_T</i> НСНО	159,3955	0,570	170,3207	0,5	148,9698	0,6	155,4575	0,57
<i>I_{ЭТА}</i>	0,9247	0,6648	0,8593	0,603	0,8563	0,603	0,8647	0,603

– в работе были приняты допущения: относительное содержание главных экологически значимых субстанций в воздухе (кислорода и углекислого газа), усреднённая высота слоя воздуха, подвергающегося техногенному загрязнению, усреднённая скорость кратного обновления объема или массы кислорода в связи с недостатком уточненных данных, что необходимо учитывать при дальнейших исследованиях;

– также учтены не все загрязняющие вещества, а только основные, которые оказывают значительное воздействие на атмосферный воздух.

Следует указать направления для дальнейшей работы:

– методика оценки должна разрабатываться для каждого компонента окружающей среды индивидуально с учетом особенностей региона исследования;

– выбор частных показателей экологического состояния среды должен строиться с учетом возможности установления их корреляционных свойств, что повысит достоверность результатов оценки;

– при оценке по возможности включить учет синоптической изменчивости показателей;

– особое внимание обратить на более детальную проработку значений максимума и минимума частных показателей.

Проведенное исследование позволило предложить методологию геоэкологической оценки качества атмосферного воздуха Севастопольского региона на основе многокритериальной и многофакторной оценки различных показателей.

Данная методология геоэкологической оценки может использоваться лицом, принимающим решение в области обеспечения экологической безопасно-

сти, для применения в компьютерной экспертной системе, позволяющей сохранять, обрабатывать, анализировать большие объемы экологических данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме ИПТС «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия» (№ госрегистрации 121122300072-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимова Т.А., Хаскин В. В.* Основы экоразвития: Учебное пособие // Рос. экон. акад. им. Г. В. Плеханова. Москва. Изд-во Рос. экон. акад. 1994. 311с.
2. *Кочуров Б.И.* Экодиагностика и сбалансированное развитие: Учебное пособие. Москва – Смоленск. Маджента. 2003. 384 с.
3. *Van Geffen J., Boersma K.F., Eskes H., Sneep M., ter Linden M., Zara M., and Veeffkind J.P.* S5P TROPOMI NO2 slant column retrieval: method, stability, uncertainties and comparisons with OMI, Atmos. Meas. Tech., 13, 1315–1335, <https://doi.org/10.5194/amt-13-1315-2020>, 2020.
4. *Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J. J., Engelen R., Eskes H., Flemming J., Huijnen V., Jones L., Kipling Z., Massart S., Parrington M., Peuch V.-H., Razinger M., Remy S., Schulz M., and Suttie M.* The CAMS reanalysis of atmospheric composition. Atmos. Chem. Phys., 19, P. 3515–3556.
5. *Моисеевкова Т.А., Хаскин В.В.* Методика расчета экологической техноёмкости территории (к проекту 2.5.6.) // М.: Российская экономическая академия им. Г.В. Плеханова. 1992. 48 с.
6. *Карелов С.В., Белик И.С. Бурмакина Л.А., Выварец К.А., Карелов А.С., Леонтьева Ю.В., Стародубец Н.В., Шуткина Д.Н., Пряхин Д.А.* Социо-, эколого-экономическая оценка состояния территории: монография. // Екатеринбург: УрФУ. 2013. 69 с.
7. *Волошин В.С., Данилова Т.Г., Елистратова Н.Ю.* Методика оценки и моделирование экологической безопасности экосистем промышленно развитого города // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 20. С. 279–282.
8. *Jacobs J.* The death and life of great American cities. New York: Vintage books. 1961. 473 p.
9. *Planning sustainable cities.* Global report on human settlements 2009 // United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). 2009. 305 p.
10. *Кочуров Б.И., Юлинов В.Л.* Экономика природопользования: Учебное пособие. М.: ЛЕНАНД. 2015. 232 с.
11. *Пичкалев А.В.* Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // Исследования наукограда. № 1 (1). 2012. С. 25–28.
12. *Harrington E.C.* The desirability Function / E.C. Harrington // Industrial Quality Control. 1965. April. V. 21. № 10. P. 494–498.

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE ATMOSPHERIC AIR QUALITY IN THE SEVASTOPOL REGION

A.A. Egorkin

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The article presents methodological approaches to the integral assessment of the atmospheric air quality of the Sevastopol region, using factor analysis methods. For the analysis, calculated and statistical data

from 2019 to 2022, characterizing the region under study, were used. The results obtained make it possible to assess the state of atmospheric air quality in dynamics over a long period of time and suggest ways to increase the efficiency of environmental safety in the region.

Keywords: geoecological assessment, atmospheric air quality, generalized desirability function, ecological technological capacity of the territory.

REFERENCES

1. *Akimova T.A. and Haskin V.V. Osnovy ekorazvitiya (Fundamentals of eco-development)*. Russian Economy G. V. Plekhanov Academy of Sciences, Moscow, Publishing House of Russian Economy. akad., 1994, 311 p.
2. *Kochurov B.I. Ekodiagnostika i sbalansirovannoe razvitie (Ecodiagnosics and balanced development)*. Moscow, Smolensk: Madzhenta, 2003, 384 p.
3. *Van Geffen J., Boersma K.F., Eskes H., Snip M., ter Linden M., Zara M., and Veeffkind J. P.* Search for inclined columns S5P TROPOMI NO₂: method, stability, uncertainties and comparisons with OMI, *Atmos. Measures. Tech.*, 13, 1315-1335, <https://doi.org/10.5194/amt-13-1315-2020>, 2020.
4. *Inness A., Ades M., Agusti-Panareda A., Barre J., Benediktov A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J.J., Engelen R., Eskes H., Flemming J., Heinen V., Jones L., Kipling Z., Massart S., Parrington M., Peuch V.-H., Razinger M., Remy S., Schultz M., and Suttly M.* Repeated analysis of atmospheric composition using CAMS, *Atmos. Chem. Physics*, 19, pp. 3515–3556.
5. *Moiseenkova T.A. and Haskin V.V. Metodika rascheta ekologicheskoy tekhnologicheskoy teritorii (k projektu 2.5.6.) (Methodology for calculating the ecological technological capacity of the territory (to the project 2.5.6.))*. Moscow, Rossijskaya ekonomicheskaya akademiya im. G.V. Plekhanova, 1992, 48 p.
6. *Karelov S.V., Belik I.S., Burmakina L.A., Vyvarec K.A., Karelov A.S., Leont'eva Yu.V., Starodubec N.V., Shutkina D.N., and Pryahin D.A.* Socio-, ekologo-ekonomicheskaya ocenka sostoyaniya territorii: monografiya (Socio-, ecological-economic assessment of the state of the territory: monograph). Yekaterinburg: UrFU, 2013, 69 p.
7. *Voloshin V.S., Danilova T.G., and Elistratova N.Y.* Metodika ocenki i modelirovanie ekologicheskoy bezopasnosti ekosistem promyshlennogo razvitogo goroda (Methodology of assessment and modeling of ecological safety of ecosystems of an industrially developed city). *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2010, No. 20, pp. 279–282.
8. *Jacobs J.* Death and Life of great American cities. New York: Vintage Books, 1961, 473 p.
9. *Planning sustainable cities*. Global Report on Human Settlements for 2009. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2009, 305 p.
10. *Kochurov B.I. and Illinov V.L.* Ekonomika prirodopol'zovaniya (Pharmacoeconomics of application). Moscow, LENAND, 2015, 232 p.
11. *Pichkalev A.V.* Generalized Harrington desirability function for comparative analysis of technical means. *Issledovaniya naukograda*, No. 1 (1), 2012, pp. 25–28.
12. *Harrington E.S.* Desirability function. *Industrial quality control*, 1965, April, Vol. 21, No. 10, pp. 494–498.