

**УДК 504.064**

**Нартов Александр Сергеевич**, доцент кафедры геоэкологии и природопользования, к.г.н., Государственный университет по землеустройству, г. Москва

**Кожевникова Виктория Вадимовна**, студент, Государственный университет по землеустройству, г. Москва

**Кузнецова Вера Валерьевна**, студент, Государственный университет по землеустройству, г. Москва

**Мельникова Анна Викторовна**, студент, Государственный университет по землеустройству, г. Москва

### **ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

В статье показана принципиальная возможность использования кластерного анализа данных методом «ближайшего соседа» при обработке результатов измерений, полученных в ходе геоэкологической оценки состояния урбоэкосистем на примере районов г. Москвы (Басманный и Коньково) и городов Московской области (г. Раменское и г. Балашиха). Приведён анализ дендрограмм, построенных в процессе кластерного анализа количественной информации о плотности энергии электромагнитных полей антропогенного происхождения, а также сведений о связи интенсивности потока автотранспорта различных категорий с концентрациями приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха.

The article demonstrates the fundamental possibility of using cluster analysis of data by the "nearest neighbor" method when processing the results of measurements obtained during the geocological assessment of the state of urban ecosystems using the example of Moscow districts (Basmanny and Konkovo) and cities of the Moscow region (Ramenskoye and Balashikha). An analysis of dendrograms constructed in the process of cluster analysis of quantitative

information on the energy density of anthropogenic electromagnetic fields, as well as information on the relationship between the intensity of the flow of motor vehicles of various categories and the concentrations of priority air pollutants is presented.

**Ключевые слова:** урбанизированные территории, кластерный анализ, загрязнение атмосферы, автотранспорт, плотность энергии электромагнитного излучения, урбоэкосистемы.

**Keywords:** urbanized areas, cluster analysis, air pollution, motor transport, electromagnetic radiation energy density, urban ecosystems..

По данным Росстата, в Российской Федерации численность городского населения составляет 74,81% (108,9 млн. человек). При этом почти 70% от общей численности населения проживает в европейской части страны, где велика плотность крупных городов-миллионников с развитой городской инфраструктурой и большим количеством промышленных предприятий [18]. Поэтому негативное воздействие объектов промышленности и инфраструктуры на качество жизни населения урбанизированных территорий давно стало серьёзной угрозой, охватывающей как социальные, так экологические и экономические аспекты.

При этом характер и последствия такого воздействия зависят от множества факторов, которые включают:

- собственные характеристики источника загрязнения (геометрические параметры, интенсивность эмиссии загрязнителей);
- свойства самих загрязнителей (класс опасности, особенности негативного воздействия на организм);
- климатические и иные природные факторы (температуру, влажность, направление и скорость ветра, наличие осадков и др.);
- наличие и степень суммарного воздействия.

Возможности, которые, на наш взгляд, открывает перед исследователями понимание закономерностей распространения электромагнитного, шумового и теплового загрязнения, а также образования, переноса и накопления

загрязняющих веществ в геосферах, особенностей их вовлечения в круговороты вещества и энергии, схематично представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Возможности применения информации закономерностях образования, переноса и накопления загрязнения в окружающей среде**

Данная информация позволяет:

1. Обнаружить источник и причины загрязнения, например, путём анализа состояний компонентов окружающей среды, предшествовавших моменту выявления загрязнения. Это даёт возможность устранить причины и/или применить карательные (правовые, экономические, административные) меры к владельцам источников загрязнения, в соответствии с экологическим законодательством;
2. Осуществить прогноз состояния окружающей среды на основе выявленных тенденций и принять своевременные управленческие решения, чтобы предотвратить распространение загрязнения и, в долгосрочной перспективе, не допустить перехода природно-урбанизированной системы (урбоэкосистемы) на качественно новый уровень, характеризующийся ухудшением параметров её компонентов.

Однако учесть все значимые факторы при проведении геоэкологической оценки практически невозможно из-за их многочисленности, неполноты данных, погрешности измерения и по ряду других причин.

Отдельно стоит отметить возможное наличие неочевидных связей и зависимостей между разнородными факторами. Зачастую такие

зависимости не сводятся к простым корреляциям. Вероятно, они описываются достаточно сложными функциями, для выявления которых требуется проведение длительных фундаментальных исследований, в то время как решать экологические задачи требуется уже сегодня.

Одним из универсальных статистических методов обработки данных является кластерный анализ. Эта процедура позволяет объединить исследуемые объекты в группы и при этом количественно оценить степень близости объектов по выбранному признаку [5, 6, 9].

В контексте экологии кластерный анализ достаточно редко применяется при обработке результатов оценки состояния урбозкосистем. Ряд учёных применяли этот статистический метод для классификации растительных сообществ и биологических видов [10], а другие исследователи использовали метод кластерного анализа для группировки зон городской застройки [8, 12, 15, 17], моделирования городской энергетической системы [13], группировки зелёных насаждений в черте города [14, 16] и т.п.

Тем не менее, в научной литературе известны примеры, демонстрирующие обширные возможности кластерного анализа при исследовании городских геосистем. Так, в работе А.П. Хаустова и М.М. Рединой кластерный анализ был использован для изучения особенностей распределения полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) различного происхождения в природных и антропогенных средах [7].

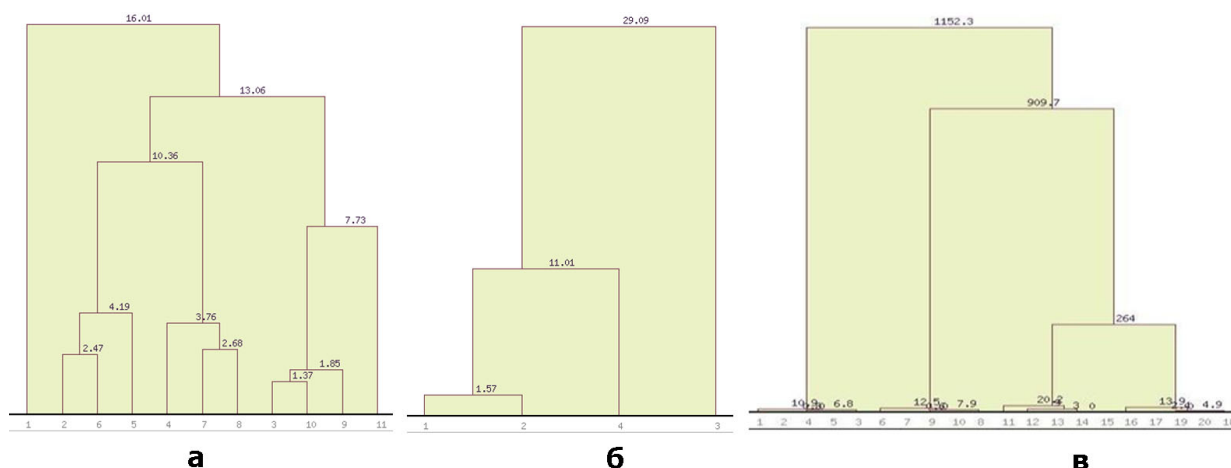
В 2024-2025 гг. нашей исследовательской группой был проведён комплекс геоэкологических исследований на территории двух районов г. Москвы (Басманный и Коньково) и в двух городах Московской области (г. Раменское и г. Балашиха), который включал измерения:

- напряжённости электрического и индукции магнитного полей на различных уровнях от земной поверхности;
- потоков автотранспорта трёх категорий (легковые автомобили, грузовые автомобили, автобусы);

- концентрации пяти приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха (диоксид серы  $SO_2$ , диоксид азота  $NO_2$ , оксид углерода  $CO$ , взвешенные твёрдые частицы  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ ).

На основе измеренных параметров неионизирующего электромагнитного излучения (ЭМИ) нами была рассчитана плотность энергии электромагнитного поля (ЭМП). Две другие группы измерений были использованы для оценки вклада автотранспорта различных категорий в эмиссию загрязнителей атмосферного воздуха.

Результаты расчётов были подвергнуты кластерному анализу методом «ближайшего соседа», а итог визуализирован в виде дендрограмм, три из которых представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Дендрограммы, полученные в результате кластерного анализа данных: а) по плотности энергии ЭМП и расстоянию до преобладающего источника ЭМИ; б) по среднему потоку автобусов и концентрациям  $NO_2$ ; в) по среднему потоку автотранспорта различных категорий и их относительному вкладу в суммарное загрязнение атмосферного воздуха**

На основе анализа полученных дендрограмм были сделанные следующие выводы:

1. На дендрограмме, построенной по вычисленным значениям плотности энергии электромагнитного излучения и расстоянии до преобладающего источника ЭМИ (участок Рязанского направления Московской железной дороги, пересекающей г. Раменское), отчётливо выделяются три кластера (рисунок 2а). Левый из них (точки 2, 5 и 6) объединяет пункты измерения, расположенные на максимальном удалении от железнодорожных путей. В них наблюдаются минимальные значения плотности энергии. В средний кластер вошли точки 4, 7 и 8: значения плотности энергии в них минимальные, несмотря на то, что измерения проводились наиболее близко к железной дороге. Третий (правый) кластер включает точки 3, 9 и 10. Пространственно они находятся между точками, попавшими в первый и второй кластеры, но значения плотности энергии в них максимальны. Т.о., кластерный анализ показывает, что на урбанизированных территориях, где присутствует одновременно несколько источников ЭМИ, важно учитывать их совокупное воздействие. Это связано с тем, что величина плотности энергии зависит от напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля в данной точке, т.е., от векторных физических величин, обладающих свойством суперпозиции.

2. Кластерный анализ, который проводился по среднему потоку автобусов и вероятности обнаружения диоксида азота в атмосфере в 4 районах Москвы и Московской области (Басманный, Коньково, г. Балашиха, г. Раменское) позволил выделить г. Балашиха в отдельный кластер рисунок 2б, точка 3). Возможно, это связано с высокой интенсивностью потока автобусов на автотрассе в Балашихе. Доля диоксида азота высока в выхлопных газах автобусов, предположительно, из-за частого торможения автобусов на остановках, в результате чего и повышается выработка двигателями диоксида азота [4]. Следующий крупный кластер (точка 4) принадлежит г. Раменское, где также наблюдалось большое количество автобусов на дорогах. Точки 1 и 2 отражают ситуацию в г. Москве (Басманный район и Коньково соответственно), где наблюдался наименее интенсивный поток автобусов,

поскольку на территории г. Москвы хорошо развит электротранспорт (метро, Московские центральные диаметры, трамваи, электробусы и т.д.), который принимает на себя основной пассажиропоток.

3. Дендрограмма, представленная на рисунке 2в, построена на основе кластерного анализа по среднему потоку автотранспорта различных категорий в указанных выше районах г. Москвы и Московской области и по их относительному вкладу в суммарное загрязнение атмосферного воздуха, которое было рассчитано с применением нашей авторской методики, разработанной на основе формулы Байеса [3]. На дендрограмме явно выделяются 4 кластера, которые соответствуют отдельным районам г. Москвы и Московской области. Вероятность вклада легковых автомобилей в загрязнение атмосферы заметно выше в г. Москва (два кластера слева), чем в городах МО (два кластера справа), т.к в Москве поток автомобилей в 2-3 раза превышает поток автомобилей в городах МО. Также следует заметить, что в Басманном районе измерения потока автомобилей производились на улице Земляной Вал, которая является частью Садового кольца. Садовое кольцо является магистральной автодорогой, которое соединяет несколько районов Москвы и центр города, поэтому это объясняет такой большой поток автомобилей. В районе Коньково также измерения проводились на самой загруженной улице района – Профсоюзной улице, которая связывает несколько районов и пересекает МКАД на юге, что также является причиной высокой загруженности дорог автотранспортом. Микрорайон Балашиха-2 (г. Балашиха) и Заводской микрорайон г. Раменское являются спальными районами, поэтому поток автотранспорта в них заметно ниже. Также на дендрограмме видно, что легковые автомобили вносят меньший вклад в загрязнение атмосферного воздуха диоксидом азота и диоксидом серы (две левые точки в каждом кластере, которые отстоят дальше от трёх других точек в том же кластере, соответствующих эмиссии угарного газа и твёрдых частиц  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ ). Результаты кластерного анализа хорошо согласуются с выводами, сделанными нами на основании результатов расчёта условной

вероятности [3] и с результатами аналогичных исследований, проведённых ранее другими авторами [1, 2, 11].

Представленные выводы показывают, что кластерный анализ по принципу «ближайшего соседа» может быть весьма информативным при обработке количественных данных, полученных в ходе геоэкологической оценки урбанизированных территорий. Он может служить как дополнительным инструментом для независимого подтверждения правильности полученных результатов, так и способом поиска новых неочевидных взаимосвязей, которые позволят лучше понять закономерности сложных процессов, протекающих в урбозкосистемах.

### Список литературы

1. Горшкова И.А., Макарова О.Ю. Анализ загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспортных средств в условиях сложившейся градостроительной ситуации в центральной части Санкт-Петербурга // Наукоедение. 2014. №4 (23).
2. Каримходжаев Н., Нумонов М.З. Сравнительный анализ токсичности выхлопных газов автомобилей и пути ее снижения // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2020. № 11(80).
3. Нартов А.С., Кожевникова В.В., Кузнецова В.В., Мельникова А.В. Оценка вклада транспортных средств различных категорий в суммарное загрязнение атмосферы городских территорий // Биоразнообразие и устойчивое развитие. 2025. Т.10. №2.
4. Пепина Л.А., Созонтова А.Н. Загрязнение атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом // Alfabuild. 2017. №1(1). С. 99-110.
5. Стрюков Р.К., Шашкин А.И. О модификации метода ближайших соседей // Вестник Воронежского государственного университета. серия: системный анализ и информационные технологии. 2015. №1. С. 114-120.
6. Трусова А.Ю. Анализ данных. Многомерные статистические методы. Учебное пособие. Самара. Изд-во Самарского университета. 2023. 92 с.

7. Хаустов А.П., Редина М.М. Парадоксы концентрирования углеводов в компонентах геосистем (на примере ПАУ) // Сергеевские чтения: геоэкологические аспекты реализации национального проекта «экология». Диалог поколений. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Выпуск 22. 2020. С. 94-103.
8. Akar A.U., Uymaz S.A. Clustering neighborhoods according to urban functions and development levels by different clustering algorithms: a case in Konya // Konya Journal of Engineering Sciences. Vol. 10 (4). 2022. pp. 889-902. DOI:10.36306/konjes.1158414.
9. Clarke K.R., Somerfield P.J., Gorley R.N. Clustering in non-parametric multivariate analyses // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. Vol.483. 2016. pp. 147-155. doi.org/10.1016/j.jembe.2016.07.010.
10. Equihua M. Fuzzy clustering of ecological data // Journal of ecology. Vol.78. No.2. 1990. pp.519-534.
11. Guo M., Ning M., Sun S., Xu C., Zhang G., Zhang L., Zhang R., Zheng J., Chen C., Jia Z., Liu Y., Bo Y. Estimation and analysis of air pollutant emissions from on-road vehicles in Changzhou, China // Atmosphere. 2024. V.15 (2). Is.192. doi.org/10.3390/atmos15020192.
12. Joan P., Giovanni F., Yukio S. Classification and clustering of buildings for understanding urban dynamics // Revue Internationale de Géomatique. Vol.31 (2). 2022. pp. 303-328. doi.org/10.3166/rig31.303-328.
13. Khajedehi M.H., Prativiera E., Bordignon S., Zarrella A., De Carli M. Geospatial clustering as a method to reduce the computational load in urban building energy simulation // Sustainable Cities and Society. Vol. 122. 2025. doi.org/10.1016/j.scs.2025.106247.
14. Pang S.E.H., Ferry Slik J.W., Zurell D., Webb E.L. The clustering of spatially associated species unravels patterns in tropical tree species distributions // Ecosphere. Vol.14. Iss.6. 2023. DOI: 10.1002/ecs2.4589.
15. Vera C., Lucchini F., Bro N., Mendoza M., Lobel H., Gutierrez F., Dimter J.,

Cuchacovic G., Reyes A., Valdivieso H., Alvarado N., Toro S. Learning to cluster urban areas: two competitive approaches and an empirical validation // EPJ Data Science. Vol. 11. 2022. doi.org/10.1140/epjds/s13688-022-00374-2.

16. Vidal D.G., Dias R.C., Teixeira C.P., Fernandes C.O., Filho W.L., Barros N., Maia R.L. Clustering public urban green spaces through ecosystem services potential: A typology proposal for place-based interventions // Environmental Science & Policy. Vol.132. 2022. pp. 262-272. doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.002.

17. Wang C., Wang Z.-H., Li Q. Emergence of urban clustering among U.S. cities under environmental stressors // Sustainable Cities and Society. Vol.63. 2020. doi.org/10.1016/j.scs.2020.102481.

18. Численность населения Российской Федерации по полу и возрасту на 1 января 2022 года. Росстат. Статистический бюллетень / [Электронный ресурс] – URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul\\_chislen\\_nasel-pv\\_01-01-2022.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_chislen_nasel-pv_01-01-2022.pdf) (дата обращения: 26.06.2025).

## References

1. Gorshkova I.A., Makarova O.Yu. Analysis of air pollution by vehicle emissions in the current urban development situation in the central part of St. Petersburg // Naukovedenie. 2014. No. 4 (23).

2. Karimkhodjaev N., Numonov M.Z. Comparative analysis of the toxicity of car exhaust gases and ways to reduce it // Universum: technical sciences: electronic scientific journal. 2020. No. 11 (80).

3. Nartov A.S., Kozhevnikova V.V., Kuznetsova V.V., Melnikova A.V. Assessment of the contribution of vehicles of various categories to the total air pollution of urban areas // Biodiversity and sustainable development. 2025. Vol. 10. No. 2.

4. Pepina L.A., Sozontova A.N. Air pollution by the road and highway complex // Alfabuild. 2017. No. 1 (1). P. 99-110.

5. Stryukov RK, Shashkin AI On modification of the nearest neighbors method // Bulletin of the Voronezh State University. series: systems analysis and information technology. 2015. No. 1. P. 114-120.
6. Trusova A.Yu. Data analysis. Multivariate statistical methods. Textbook. Samara. Publishing house of Samara University. 2023. 92 p.
7. Khaustov A.P., Redina M.M. Paradoxes of hydrocarbon concentration in components of geosystems (on the example of PAHs) // Sergeev readings: geoecological aspects of the implementation of the national project "Ecology". Dialogue of generations. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology. Issue 22. 2020. P. 94-103.
8. Akar A.U., Uymaz S.A. Clustering neighborhoods according to urban functions and development levels by different clustering algorithms: a case in Konya // Konya Journal of Engineering Sciences. Vol. 10 (4). 2022. pp. 889-902. DOI:10.36306/konjes.1158414.
9. Clarke K.R., Somerfield P.J., Gorley R.N. Clustering in non-parametric multivariate analyses // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. Vol.483. 2016. pp. 147-155. doi.org/10.1016/j.jembe.2016.07.010.
10. Equihua M. Fuzzy clustering of ecological data // Journal of ecology. Vol.78. No.2. 1990. pp.519-534.
11. Guo M., Ning M., Sun S., Xu C., Zhang G., Zhang L., Zhang R., Zheng J., Chen C., Jia Z., Liu Y., Bo Y. Estimation and analysis of air pollutant emissions from on-road vehicles in Changzhou, China // Atmosphere. 2024. V.15 (2). Is.192. doi.org/10.3390/atmos15020192.
12. Joan P., Giovanni F., Yukio S. Classification and clustering of buildings for understanding urban dynamics // Revue Internationale de Géomatique. Vol.31 (2). 2022. pp. 303-328. doi.org/10.3166/rig31.303-328.
13. Khajedehi M.H., Prativiera E., Bordignon S., Zarrella A., De Carli M. Geospatial clustering as a method to reduce the computational load in urban building energy simulation // Sustainable Cities and Society. Vol. 122. 2025.

doi.org/10.1016/j.scs.2025.106247.

14. Pang S.E.H., Ferry Slik J.W., Zurell D., Webb E.L. The clustering of spatially associated species unravels patterns in tropical tree species distributions // *Ecosphere*. Vol.14. Iss.6. 2023. DOI: 10.1002/ecs2.4589.

15. Vera C., Lucchini F., Bro N., Mendoza M., Lobel H., Gutierrez F., Dimter J., Cuchacovic G., Reyes A., Valdivieso H., Alvarado N., Toro S. Learning to cluster urban areas: two competitive approaches and an empirical validation // *EPJ Data Science*. Vol. 11. 2022. doi.org/10.1140/epjds/s13688-022-00374-2.

16. Vidal D.G., Dias R.C., Teixeira C.P., Fernandes C.O., Filho W.L., Barros N., Maia R.L. Clustering public urban green spaces through ecosystem services potential: A typology proposal for place-based interventions // *Environmental Science & Policy*. Vol.132. 2022. pp. 262-272. doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.002.

17. Wang C., Wang Z.-H., Li Q. Emergence of urban clustering among U.S. cities under environmental stressors // *Sustainable Cities and Society*. Vol.63. 2020. doi.org/10.1016/j.scs.2020.102481.

18. Population of the Russian Federation by sex and age as of January 1, 2022. Rosstat. Statistical Bulletin / [Electronic resource] - URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul\\_chislen\\_nasel-pv\\_01-01-2022.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_chislen_nasel-pv_01-01-2022.pdf) (date accessed: 06/26/2025).