

УДК 332.1,504

ББК 65.04

И.П. ДАНИЛОВ, Т.И. ЛАДЫКОВА
**КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ВЫБРОСОВ
В АТМОСФЕРУ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ:
РЕГИОНАЛЬНЫЙ АСПЕКТ***

Ключевые слова: парниковые газы, декарбонизация, региональная экономика, кластерный анализ, индикативное планирование.

В статье представлены основные результаты исследования процессов эмиссии парниковых газов в России. Актуальность исследования заключается в том, что его результаты могут стать основой индикативного планирования снижения уровня загрязнения атмосферы и декарбонизации экономики Российской Федерации.

Цель исследования – выявление основных направлений снижения загрязнения атмосферного воздуха в субъектах Российской Федерации.

Материалы и методы. Информационная основа исследования состоит из статистических данных Росстата за период 2000–2022 гг. по 82 субъектам Российской Федерации, федеральным округам, городам Москва, Санкт-Петербург, Севастополь и Российской Федерации в целом. В процессе исследования осуществлялись корреляционный и кластерный анализы (методы «k-means» и определение медиан показателей каждого кластера), а также применялся метод главных компонент.

Результаты. На основе 14 расчетных индикаторов были сформированы 5 главных компонент, характеризующих загрязнение атмосферы: 1-я – экономическая составляющая, 2-я – социальная составляющая, 3-я – вклад мобильных источников, 4-я – преобладание в выбросах твердых веществ и оксида углерода, 5-я – социальные и экономические последствия выбросов диоксида серы, а также экономические – оксидов азота и углеводородов. В исследовании была обоснована модель для анализа социальных и экономических последствий выбросов парниковых газов, в рамках которой была проведена оценка экономики федеральных округов Российской Федерации и субъектов Приволжского федерального округа. Полученные результаты также позволили выделить 6 кластеров, включающих субъекты Российской Федерации, отличающихся различными уровнями основных аспектов эмиссии парниковых газов.

Выводы. Для регионов, отнесенных к 1-му кластеру, необходимо планировать реализацию мероприятий и инвестиций, направленных на снижение выбросов углеводородов. Для регионов 2-го кластера, характеризующегося наиболее неблагоприятными показателями социальной нагрузки от загрязнения атмосферы, приоритетной целью выступает снижение выбросов оксида углерода. В регионах 3-го кластера, являющегося наиболее благополучным, следует продолжать реализацию стратегии по сокращению объемов всех видов выбросов. Мероприятия для регионов, включенных в 4-й кластер, должны быть направлены на снижение выбросов диоксида серы, оксидов азота и твердых веществ. В регионах 5-го кластера необходимо обеспечить сокращение всех видов атмосферных выбросов, уделяя особое внимание снижению выбросов углеводородов, оксидов азота и оксида углерода. В регионах 6-го кластера требуется снизить выбросы в атмосферу от мобильных источников загрязнения. Практическая значимость представленного исследования обусловлена тем, что предложенная модель позволит принимать эффективные управленческие решения при разработке стратегий и программ безэмиссионного развития и декарбонизации экономики субъектов Российской Федерации.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-28-10317 и Чувашской Республики, <https://rscf.ru/project/23-28-10317>.

Введение. Климатическая повестка является в настоящее время актуальной как во всем мировом сообществе, так и в Российской Федерации, что находит отражение в государственных стратегических документах¹. При этом признается, что изменение климата несет серьезные риски во многих областях социально-экономической деятельности. Одним из основных, но не единственным инструментом ограничения негативной трансформации климата на планете является снижение выбросов парниковых газов (ПГ). Также данное направление считается важной составляющей процессов декарбонизации социально-экономических систем. В то же время высказываются научно обоснованные возражения против негативного влияния человечества на климат [2].

В настоящее время проводятся исследования как общих, так и специализированных вопросов выбросов ПГ. В Российской Федерации, так же как и во многих других странах, наибольшие объемы загрязнения атмосферы приходится на энергетический сектор, далее следует промышленность, за ними сельское хозяйство [5]. При этом было установлено, что среднегодовые темпы приближения к целям сокращения выбросов ПГ российских нефтегазовых компаний выше, чем зарубежных [13].

Для оценки процесса декарбонизации энергетического сектора и обеспечения его сопоставимости в международном контексте была разработана система оценочных показателей [14]. В металлургической промышленности проведенное исследование пространственного распределения выбросов в черной металлургии в совокупности с выделенными региональными особенностями может лечь в основу разработки точечных программ декарбонизации как для отрасли, так и для регионов размещения металлургических предприятий [8].

В сельском хозяйстве для снижения выбросов ПГ была предложена модель цифрового управления животноводством [9]. Исходя из специфики производства продукции растениеводства был обоснован подход к прогнозированию выбросов ПГ [3]. Кроме того, использовалась модель GLOBIOM Russia, где калибровочными были статистические данные по регионам России, по площадям посева, валовым сборам и урожайностям 28 основных возделываемых культур в хозяйствах всех категорий и площадям земель по категориям [12]. Было обосновано положение о том, что наибольшим эффектом по сокращению выбросов ПГ обладают различные технологии «углеродного земледелия» за счет применения наилучших методов возделывания почв и эффективного внесения удобрений [1].

Применительно к городской экономике исследовалось влияние развития цифровизации на выбросы CO₂ в 280 городах Китая. При этом использовалась производственная функция Кобба–Дугласа совместно с такими индикаторами, как доля городского населения, ВВП на душу населения в городах, открытость торговли и экологические нормы [16]. Для конкретного городского района Ла-Карраска в испанском городе Валенсия была предложена методология оценки потенциала декарбонизации в аспекте снижения выбросов ПГ [15].

¹ Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.: распоряжение Правительства Российской Федерации № 3052-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341?ysclid=m23ygtkxo9o876520933> (дата обращения: 24.04.2025).

Для исследованной группы стран (КНР, США, ЕС, Индии, Российская Федерация, Польша и мир) было обнаружено, что численность населения и ВВП в наибольшей степени влияют на выбросы CO₂. Отмечалось, что для развитых стран характерна обратная зависимость: рост численности населения и рост ВВП ведут к снижению эмиссии, что во многом связано с преобладанием доли сектора услуг в национальной экономике [4].

Цель исследования – выявление основных направлений снижения загрязнения атмосферного воздуха в субъектах Российской Федерации на основе разработанной методики анализа эмиссии ПГ, позволяющее повысить эффективность индикативного планирования данного направления социально-экономического развития страны.

Материалы и методы. В статье использовались методы корреляционного и кластерного анализов выбросов ПГ в регионах Российской Федерации (методы «k-means» и определение медиан показателей каждого кластера), а также метод главных компонент. Расчеты осуществлялись в Python, совместно с библиотеками Pandas, NumPy, Sklearn, Statsmodels. Графики строились в Matplotlib. Показатели выбросов в атмосферу приведены на душу населения для определения социальной нагрузки от них и в млн руб. валового регионального продукта (ВРП), позволяющие оценить экологичность выпускаемой продукции в регионе в аспекте загрязнения атмосферы.

Результаты исследования. В процессе исследования использовались данные Росстата за период 2020–2022 гг. Сборники Росстата с расшифровкой состава выбросов в атмосферу в региональном аспекте выходят раз в 2 года. В последнем из них приводилась информация за 2022 г. Данное обстоятельство предопределило выбор временного интервала для анализа. При этом учитывалось такое обстоятельство, что в указанных источниках актуальные показатели ВРП были представлены по состоянию на 2021 г. Поэтому было осуществлено их прогнозирование на 2022 г. с помощью модели ARIMA. Сформированный набор показателей состоит из 4 116 записей [6, 7, 10, 11].

Каждый субъект Российской Федерации можно представить в векторной форме:

$$Y_i = (Y_{1i}, Y_{2i}, Y_{3i}, \dots, Y_{ni}),$$

где Y_{ki} – вектор значений индикаторов по k -му российскому региону.

При использовании большого числа индикаторов возникает необходимость уменьшения их количества для повышения скорости обработки исходного массива данных, что приводит к уменьшению величины информативности, которая тем не менее позволяет объективно интерпретировать полученные результаты.

Вследствие этого становится возможным из большого числа субъектов Российской Федерации сформировать несколько кластеров, в каждом из которых в процессе индикативного планирования будут предусматриваться к реализации свои наборы мер управляющего воздействия на социально-экономические процессы, определяющих достижение запланированных величин системы индикаторов.

Статистической основой исследования выступили расчетные индикаторы, характеризующие загрязнение атмосферного воздуха в Российской Федерации, приведенные на рис. 1.

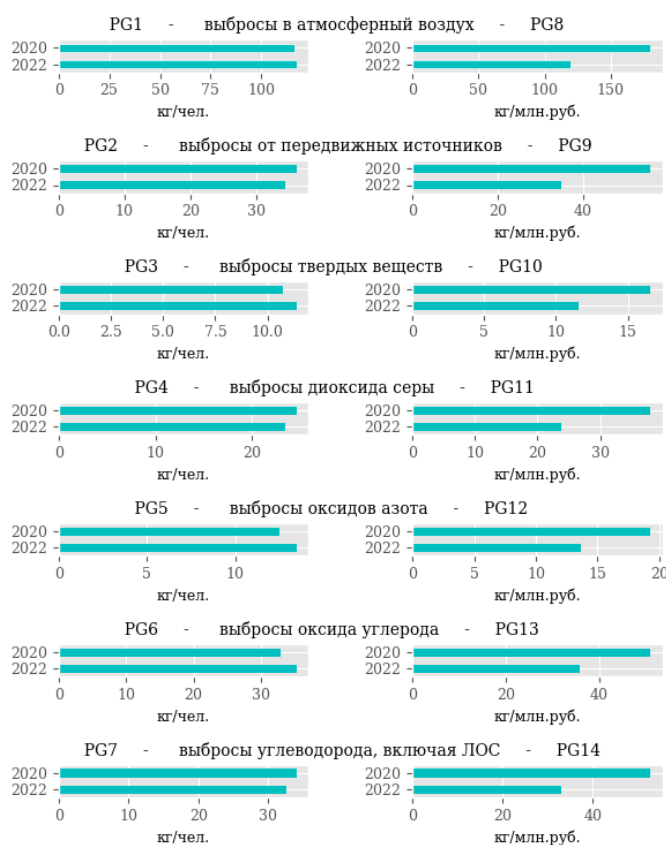


Рис. 1. Индикаторы загрязнения атмосферы в России

В целом по Российской Федерации в наибольшей степени за анализируемый период уменьшились выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, отходящих от передвижных источников при производстве ВРП (–37,605%) (PG₉). Далее следовали приведенные к ВРП выбросы диоксида серы (–37,58%) (PG₁₁), выбросы углеводорода, включая летучие органические соединения (–37,413%) (PG₁₄), выбросы загрязняющих веществ (–33,796%) (PG₈), выбросы твердых веществ (–30,331%) (PG₁₀), выбросы оксида углерода (–29,777%) (PG₁₃), выбросы оксидов азота (–29,154%) (PG₁₂). Также отмечалось снижение подушевой нагрузки по выбросам, отходящим от передвижных источников (–4,825%) (PG₂), выбросам диоксида серы (–4,787%) (PG₄), выбросам углеводорода, включая летучие органические соединения (–4,532%) (PG₇).

В то же время выросли такие подушевые индикаторы, как выбросы загрязняющих веществ (0,986%) (PG₁), выбросы твердых веществ (6,271%) (PG₃), выбросы оксида углерода (7,115%) (PG₆) и выбросы оксидов азота (8,066%) (PG₅).

Далее был проведен корреляционный анализ заданных индикаторов. При этом корреляция определялась как последовательное отношение ковариации каждого индикатора с каждым на произведение их стандартных отклонений

(ковариация отражает положительную или отрицательную взаимосвязь индикаторов). Полученные коэффициенты корреляции находились в диапазоне от -1 до 1 . Значение данного коэффициента, равное 1 , свидетельствует об идеальной положительной корреляции между индикаторами, 0 – между индикаторами отсутствует какая-либо взаимосвязь, -1 – индикаторы обладают идеальной отрицательной корреляцией (изменяются в противоположных направлениях).

В рамках данного исследования был осуществлен анализ многомерных массивов с выделением нескольких кластеров, включающих субъекты Российской Федерации со схожими величинами заданных индикаторов. В качестве инструмента кластерного анализа использовался метод главных компонент (PCA – Principal Component Analysis), который заключается в последовательных линейных ортогональных преобразованиях. Данный метод позволил уменьшить размерность первоначально сформированных массивов данных, базирующихся на 14 индикаторах с допустимым для кластерного анализа снижением информативности за счет использования 5 главных компонент (ГК).

Первая ГК является признаком, вызывающим наибольшую дисперсию. Вторая ГК соответственно обуславливает следующую по величине дисперсию и т.д. При этом все ГК никак не коррелируются.

При реализации корреляционного и кластерного анализа набор используемых показателей должен быть нормализован. Например, если набор функций в методе ГК содержит данные, выраженные в кг выбросов на душу населения и кг выбросов на млн руб., как в данном исследовании, масштаб дисперсии может получиться значительным. Поэтому факторные нагрузки для функций с высокой дисперсией также будут большими. Следовательно, основные компоненты будут смещены в сторону показателей с высокой дисперсией, что может привести к необъективным выводам. Поэтому массив исходных данных был нормализован.

Затем были вычислены собственные векторы и собственные значения ковариационной матрицы. Собственные векторы представляют собой специальные векторы, связанные с квадратной матрицей. Собственный вектор матрицы – это ненулевой вектор, который при умножении на матрицу дает скалярное число, кратное самому себе, называемое собственным числом (значением).

Далее на основе полученных нормализованных значений 14 исходных индикаторов были программным способом в Pandas определены главные компоненты, которые являются новыми расчетными переменными, смесью исходных. При этом каждая компонента – это линейная комбинация исходных переменных с соответствующими «весами». Эти комбинации выполняются таким образом, что новые переменные (т.е. главные компоненты) не коррелированы, и большая часть информации в исходных переменных помещается в первых компонентах.

Поскольку существует столько главных компонент, сколько переменных в наборе, главные компоненты строятся таким образом, что первая из них учитывает наибольшую возможную дисперсию в наборе данных, вторая – наибольшие дисперсии из оставшихся и т.д. В рамках данного исследования был выбран расчет 5 главных компонент, чтобы уменьшить размерность с 14 (расчетные индикаторы) до 5 редуцированных на их основе (табл. 1).

Таблица 1

Значения ГК

Компонента	Значение	Накопленное значение	Дисперсия, %	Накопленная дисперсия, %
F1	0,66545	0,66545	46,438	46,438
F2	0,25034	0,91579	17,469	63,907
F3	0,12415	1,03994	8,664	72,571
F4	0,11951	1,15945	8,34	80,911
F5	0,09284	1,25229	6,479	87,389

В нашем исследовании первая ГК обуславливает дисперсию, равную 46,438%, вторая – вызывает 17,469% отклонений в наборе данных, третья – 8,664 %, четвертая – 8,34%, пятая – 6,479%. В совокупности можно отметить, что 87,389% информации, содержащейся в анализируемом массиве данных, охватывается первыми пятью ГК (сумма значений равнялась 1,25229), которые использовались в дальнейшем анализе. Таким образом, за счет использования метода главных компонент исходный 14-мерный набор данных может быть преобразован в 5-мерный.

Модели ГК имели следующую факторную структуру, обусловленную корреляцией между ними и исходными индикаторами:

$$F1 = -0,29352PG_1 - 0,05493PG_2 - 0,43575PG_3 - 0,13491PG_4 - 0,21236PG_5 - 0,25533PG_6 - 0,25914PG_7 - 0,32975PG_8 + 0,09875PG_9 - 0,35656PG_{10} - 0,1221PG_{11} - 0,33182PG_{12} - 0,37036PG_{13} - 0,13234PG_{14}; \quad (1)$$

$$F2 = -0,33255PG_1 + 0,12052PG_2 - 0,03723PG_3 + 0,05086PG_4 - 0,28199PG_5 - 0,38826PG_6 - 0,39788PG_7 + 0,18516PG_8 + 0,18862PG_9 + 0,55342PG_{10} + 0,14813PG_{11} + 0,2869PG_{12} + 0,03502PG_{13} - 0,02677PG_{14}; \quad (2)$$

$$F3 = -0,10149PG_1 - 0,46181PG_2 + 0,22979PG_3 - 0,10507PG_4 - 0,0469PG_5 - 0,08528PG_6 - 0,1069PG_7 - 0,14067PG_8 - 0,74627PG_9 + 0,27214PG_{10} - 0,10782PG_{11} - 0,06352PG_{12} - 0,13741PG_{13} - 0,07987PG_{14}; \quad (3)$$

$$F4 = -0,03104PG_1 - 0,31854PG_2 - 0,50934PG_3 + 0,18887PG_4 - 0,14127PG_5 - 0,07754PG_6 - 0,02392PG_7 + 0,36919PG_8 - 0,27922PG_9 - 0,30182PG_{10} + 0,23841PG_{11} + 0,09478PG_{12} + 0,40609PG_{13} + 0,19958PG_{14}; \quad (4)$$

$$F5 = -0,11416PG_1 - 0,10159PG_2 - 0,21451PG_3 - 0,53457PG_4 + 0,01694PG_5 - 0,02203PG_6 + 0,21637PG_7 - 0,0713PG_8 + 0,07885PG_9 + 0,07575PG_{10} - 0,49877PG_{11} + 0,39806PG_{12} + 0,08027PG_{13} + 0,40813PG_{14}. \quad (5)$$

Первая ГК в наибольшей степени коррелировалась с экономическим уровнем эмиссии PG (PG₈, PG₁₀, PG₁₃), а также социальным индикатором PG₃. При этом данная ГК практически никак не коррелировалась с уровнями выбросов мобильных их источников (PG₂ и PG₉). Поэтому ее можно охарактеризовать как экономическую составляющую загрязнения атмосферы, особенно твердыми веществами и оксидом углерода, мероприятия по снижению которых при производстве ВРП должны выступать приоритетами индикативного планирования.

На значение второй ГК преимущественно влияли социальные индикаторы PG_1 , PG_5 , PG_6 , PG_7 , а также экономическая компонента PG_{10} . Практически не влияли PG_3 , PG_4 , PG_{13} и PG_{14} . Поэтому данную ГК можно классифицировать как социальную составляющую загрязнения атмосферы, а приоритетами индикативного планирования – мероприятия, приводящие к снижению подушевой нагрузки как в целом по загрязняющим веществам, так и по конкретным газам.

В третьей ГК преобладала дисперсия выбросов PG_2 и PG_9 . Поэтому ее можно классифицировать как вклад мобильных источников в загрязнение атмосферы. Следовательно, в качестве приоритетов индикативного планирования должны выступать мероприятия, направленные на снижение их негативного воздействия.

В четвертой ГК определяющими были такие анализируемые показатели, как PG_3 , PG_8 и PG_{13} . Применительно к данной ГК следует отметить, что выделенные индикаторы также присутствуют и в первой ГК, но в рамках четвертой ГК они обладают наибольшими значениями в разрезе ГК и соответственно позволяют конкретизировать приоритеты индикативного планирования в рамках конкретных регионов.

Значение пятой ГК преимущественно зависело от показателей PG_4 , PG_{11} , PG_{12} и PG_{14} , которые не используются в других ГК и связаны с социальными и экономическими последствиями выбросов диоксида серы, а также экономическими – оксидов азота и углеводородов, включая летучие органические соединения.

Далее были рассчитаны общие показатели выбросов ПГ по субъектам Российской Федерации по следующей формуле:

$$RPG = \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3 + \beta_4 F_4 + \beta_5 F_5, \quad (6)$$

где β_i – доля общей дисперсии i -й ГК; F_i – i -я ГК.

На основе рассчитанных коэффициентов модель для расчета выбросов ПГ в региональной экономике принимает следующий вид:

$$RPG = 0,531F_1 + 0,2F_2 + 0,099F_3 + 0,095F_4 + 0,074F_5. \quad (7)$$

Фрагмент результатов расчетов для федеральных округов отражен в табл. 2. Федеральные округа отсортированы в зависимости от величины полученных значений показателя оценки выбросов ПГ региональной экономикой в соответствии с моделью (7).

Фрагмент результатов аналогичных расчетов для регионов, входящих в Приволжский федеральный округ (ПФО), отражен в табл. 3.

Далее был проведен кластерный анализ данных Росстата за 2022 г. с учетом отмеченной выше специфики показателя ВРП. Сформированный набор показателей включал 576 записей.

Таблица 2

Оценка выбросов ПГ по федеральным округам в 2022 г.

Федеральный округ	F1	F2	F3	F4	F5	RPG
Северо-Кавказский	3,70865	0,88633	1,7733	0,89859	1,33635	2,50855
Центральный	3,65332	0,64746	2,35955	1,06059	1,20718	2,4954
Южный	3,43563	0,75122	2,22393	1,2048	1,34507	2,411
Приволжский	3,25565	0,80856	2,08626	1,15872	1,36522	2,31027
Северо-Западный	3,36108	0,57268	2,31951	0,97385	1,11999	2,30645
Российская Федерация	3,15201	0,76528	2,19935	1,04489	1,19709	2,23443
Дальневосточный	2,43372	1,19635	2,40489	0,54645	1,14949	1,90819
Уральский	2,30202	0,65862	1,98981	1,01058	1,28841	1,74415
Сибирский	1,53183	1,39832	1,64841	1,17566	0,89192	1,43527

Таблица 3

Оценка эмиссии ПГ в субъектах ПФО в 2022 г.

Субъект	F1	F2	F3	F4	F5	RPG
Ульяновская область	3,64624	0,74244	2,34008	1,1031	1,30752	2,52019
Пензенская область	3,6462	0,70689	2,35436	1,13822	1,30647	2,51775
Чувашская Республика	3,59882	0,70855	2,36479	1,2157	1,35463	2,5049
Нижегородская область	3,54646	0,76924	2,15726	1,05126	1,31854	2,45027
Республика Татарстан	3,43168	0,65374	2,25847	1,14795	1,30196	2,38422
Республика Марий Эл	3,3142	0,90244	2,19848	1,17293	1,48311	2,38137
Саратовская область	3,44273	0,91118	1,7039	0,9706	1,39751	2,37674
Самарская область	3,36811	0,69823	2,26881	1,20499	1,30474	2,36601
Российская Федерация	3,15201	0,76528	2,19935	1,04489	1,19709	2,23443
Республика Мордовия	3,02944	1,26704	1,4031	0,90929	1,77268	2,2204
Республика Башкортостан	3,02866	0,86715	1,98135	1,29859	1,51875	2,2157
Пермский край	3,05089	0,85264	2,06639	1,08488	1,45348	2,2078
Удмуртская Республика	2,92614	0,84956	2,1502	1,30299	1,33817	2,16147
Кировская область	2,8961	1,34255	1,54119	0,74005	1,43063	2,13682
Оренбургская область	2,549	0,84253	1,72006	1,37461	1,19011	1,91287

Использованный в исследовании алгоритм кластеризации К-средних (k-means) является одним из самых популярных вследствие относительной его простоты и скорости вычислений. Его применяют в различных областях, в том числе при анализе экономических показателей и индикативном планировании. При этом вычисляется квадрат евклидова расстояния, основываясь на котором алгоритм К-средних минимизирует внутрикластерную сумму квадратов ошибок (SSE), рассчитанных на основе полученных ГК. При неоптимальном выборе центральных точек инициализации могут проявляться слабый эффект кластера или медленная скорость сходимости. Поэтому данный алгоритм выполняется несколько раз для набора данных и затем выбирается наиболее оптимальное число кластеров на основе суммы квадратов ошибок в кластере (SSE).

В процессе проведения кластерного анализа были получены следующие основные результаты. Было выявлено оптимальное число кластеров (рис. 2).

Здесь для визуализации зависимости суммы квадратов ошибок в кластере (SSE) от их числа используется метод изгиба графика («критерий локтя»), когда он принимает более пологий вид. Кроме того, приводится тестовое распределение субъектов Российской Федерации в зависимости от заданного числа кластеров (5, 6 и 7).

Группировка субъектов Российской Федерации по заданным кластерам приведена на рис. 3.

Анализ показал, что в рамках данного исследования оптимальным выступает распределение субъектов Российской Федерации на 6 кластеров.

В целях выявления специфических особенностей субъектов Российской Федерации, входящих в тот или иной кластер, были рассчитаны средние кластерные значения ГК. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

В качестве представителей кластеров были выбраны субъекты Российской Федерации, показатель декарбонизации которых был близок к медианному значению конкретного кластера (табл. 5). Поэтому представительство кластеров

выглядит следующим образом: 1-й кластер – Курская область; 2-й – Вологодская область; 3-й – Новосибирская область; 4-й – Республика Бурятия; 5-й – Ямало-Ненецкий автономный округ; 6-й – Ставропольский край.

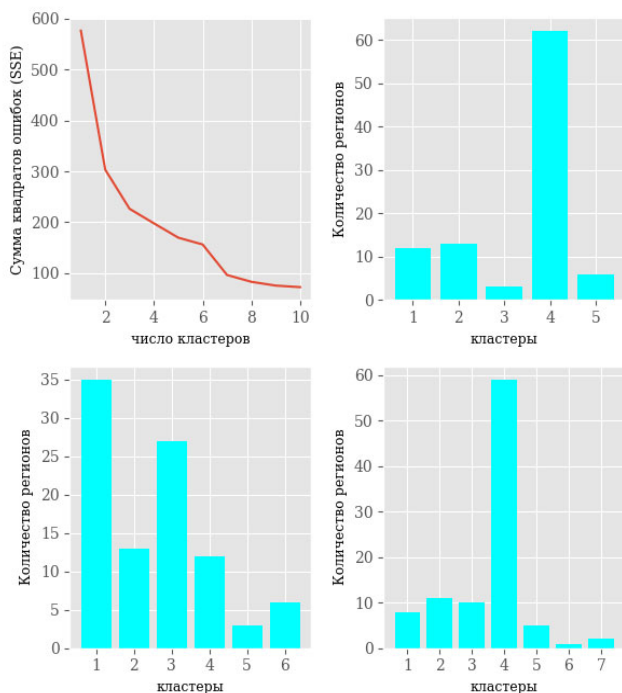


Рис. 2. Определение оптимального числа кластеров

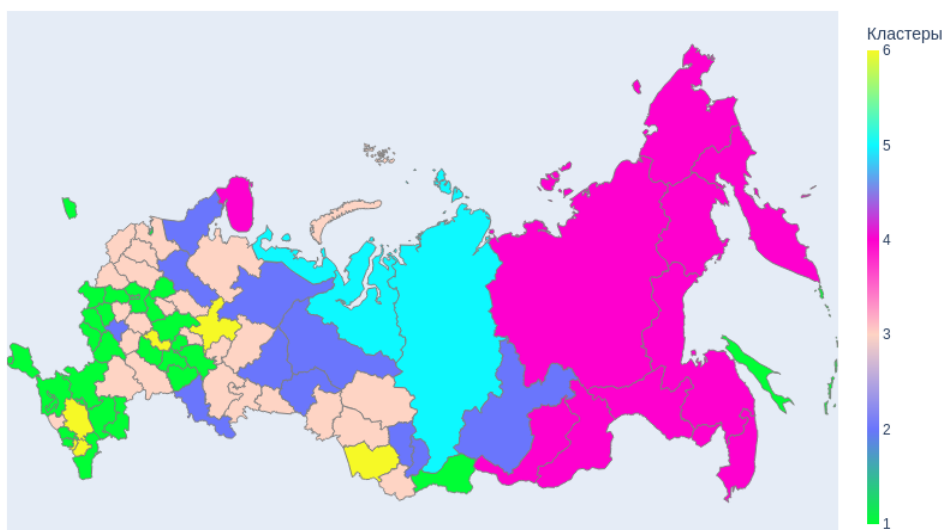


Рис. 3. Кластеры процессов эмиссии ПГ в Российской Федерации

Таблица 4

Средние значения ГК по кластерам

Главные компоненты	Кластеры					
	1	2	3	4	5	6
F1	3,52	1,74	3,09	2,21	–0,76	3,32
F2	0,74	0,88	0,98	1,29	–1,47	1,26
F3	2,28	1,82	2,04	2,32	0,31	1,2
F4	1,07	1,08	1,09	0,36	–0,35	0,63
F5	1,27	1,22	1,45	1,07	–0,73	1,44
RPG	2,44	1,48	2,25	1,78	–0,75	2,3

Таблица 5

Показатели субъектов Российской Федерации – представителей кластеров

Показатели	Кластеры					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
PG1	47,8	311,86	70,86	109,79	2014,05	37,01
PG2	25,21	29,95	33,89	40,32	47,23	77,82
PG3	4,4	23,83	13,6	24,22	69,09	2,97
PG4	2,44	24,63	15,32	37,14	22,64	0,28
PG5	4,87	20,55	16,35	17,55	293,91	6,36
PG6	8,15	202,8	16,14	22,37	980,68	10,69
PG7	23,81	37,39	8,7	7,8	625,88	15,56
PG8	66,79	328,4	114,99	292,48	231,7	97,84
PG9	35,23	31,53	55,0	107,43	5,43	205,73
PG10	6,16	25,1	22,07	64,51	7,95	7,86
PG11	3,41	25,94	24,86	98,95	2,6	0,73
PG12	6,81	21,64	26,54	46,74	33,81	16,82
PG13	11,39	213,56	26,19	59,59	112,82	28,25
PG14	33,27	39,37	14,11	20,77	72,0	41,15

Самое высокое значение интегрального показателя эмиссии ПГ региональной социально-экономической системы (RPG) было отмечено в 1-м кластере (Российская Федерация в целом, Центральный, Северо-Западный, Южный федеральные округа, города Москва, Санкт-Петербург, Севастополь, 28 регионов) – 2,44. Здесь и далее федеральные округа учитываются как отдельные субъекты Российской Федерации. При этом значения первой ГК (3,52) и второй ГК (2,28) были максимальными среди всех кластеров, а третьей и четвертой ГК (2,28 и 1,07 соответственно) – близки к максимальному. В данный кластер вошли регионы, где были минимальными значения индикаторов PG₂, PG₅, PG₆, PG₈, PG₁₀, PG₁₂.

В то же время индикаторы PG₇ и PG₁₄ (выбросы углеводорода, включая летучие органические соединения) были относительно высоки в сравнении с другими кластерами. Исходя из этого в регионах данного кластера необходимо планировать реализацию и инвестиций, направленных на их снижение.

Далее по величине RPG расположился шестой кластер (2,3) (6 регионов), который характеризовался околосредними значениями первой (3,32), второй (1,26) и пятой (1,44) ГК. В регионах этого кластера были получены минимальные значения индикаторов PG₁, PG₃, PG₄, PG₁₁. В то же время здесь были максимальными значения PG₂ и PG₉ – выбросы от передвижных источников.

Поэтому в регионах этого кластера приоритетное внимание следует уделять мобильным источникам выбросов в атмосферу.

Третья по значению величина RPG (2,25) была зафиксирована в регионах, входивших в третий кластер (Северо-Кавказский и Приволжский федеральные округа, 25 регионов), где четвертая и пятая ГК (1,09 и 1,45) были максимальными, а первая и третья ГК (3,09 и 2,04) – около максимальных значений. При этом в регионах данного кластера отсутствуют максимальные и квазimaxимальные значения расчетных индикаторов. Поэтому в аспекте эмиссии ПГ их можно признать наиболее благополучными. В то же время имеются индикаторы, по которым данный кластер находится по величине на 3-м месте – PG₉, PG₁₀, PG₁₁, PG₁₂. Следовательно, приоритетным направлением здесь может выступать повышение экономической составляющей при производстве ВРП, связанной с мобильными источниками, выбросами твердых веществ, диоксида серы и оксидов азота.

Далее расположился 4-й кластер (RPG – 1,78) (Дальневосточный федеральный округ и 11 регионов), у которого значения второй ГК (1,29) и третьей ГК (2,32) были максимальными. Особенностью данного кластера является то, что в него входит как сам Дальневосточный федеральный округ, так и регионы, его составляющие, за исключением Сахалинской области. Также в него входит Мурманская область. В этом кластере максимальными были значения индикаторов PG₄, PG₁₀, PG₁₁, PG₁₂. Поэтому в рамках данного кластера целесообразны приоритетная реализация мероприятий и осуществление инвестиций, связанных со снижением выбросов диоксида серы, оксидов азота, а также твердых веществ.

На пятом месте расположился 2-й кластер (Уральский и Сибирский федеральные округа, 11 регионов) (RPG – 1,48). Здесь значение четвертой ГК было близко к максимальному (1,08). Регионы данного кластера обладали максимальными значениями PG₈ и PG₁₃, а также вторыми по величине среди кластеров значениями PG₁, PG₄, PG₅, PG₆, PG₇, PG₁₀, PG₁₁. Данный кластер следует признать самым неблагополучным в аспекте социальной нагрузки выбросов в атмосферу. Особенно велики объемы выбросов оксида углерода. Поэтому в этих регионах необходимо планировать и реализовывать все существующие и перспективные направления снижения выбросов вредных веществ в атмосферу.

Самое низкое, причем отрицательное, значение RPG было отмечено в регионах пятого кластера (–0,75), в который входили Ненецкий и Ямало-Ненецкий автономные округа и Красноярский край, обладавшие значительно отличными значениями ГК и расчетных индикаторов. Здесь фиксировались отрицательные значения всех ГК, кроме третьей. При этом в данном кластере индикаторов PG₁, PG₃, PG₅, PG₆, PG₇, PG₁₄ принимали максимальные значения. Это свидетельствует о высокой социальной нагрузке эмиссии ПГ. При этом парниковую эффективность региональной экономики нельзя признать высокой вследствие того, что индикатор PG₁₄ является максимальным среди регионов других кластеров, а PG₈, PG₁₂, PG₁₃ близки более к максимальным, нежели к минимальным значениям. Вследствие этого в регионах данного кластера приоритетными направлениями должны выступать мероприятия и инвестиции, связанные со снижением всех выбросов в атмосферу, особенно углеводорода, включая летучие органические соединения, а также оксидов азота и углерода.

Выводы. На основании предложенной системы расчетных показателей была разработана методика оценки эмиссии ПГ с построением математической модели для повышения эффективности индикативного планирования социально-экономического развития страны.

Сформировано 6 кластеров, различающихся основными характеристиками эмиссии ПГ и иных выбросов в атмосферу. В 1-м кластере было отмечено самое высокое значение интегрального показателя эмиссии ПГ региональной социально-экономической системы (RPG), равное 2,44. В регионах данного кластера необходимо планировать реализацию мероприятий и инвестиций, направленных на снижение выбросов углеводорода, включая ЛОС.

Во 2-м кластере значение RPG составляло 1,48, и этот кластер самый неблагоприятный в аспекте социальной нагрузки выбросов в атмосферу. Особенно велики объемы выбросов оксида углерода. Поэтому в этих регионах необходимо планировать и реализовывать все существующие и перспективные направления снижения выбросов вредных веществ в атмосферу.

В 3-м кластере значение RPG равнялось 2,25. При этом в регионах данного кластера отсутствовали максимальные и околорексимальные значения расчетных индикаторов. Поэтому в аспекте эмиссии ПГ их можно признать наиболее благоприятными. В то же время имелись индикаторы, по которым данный кластер находился по величине на 3-м месте. Следовательно, приоритетными направлениями здесь могут выступать повышение экономической составляющей при производстве ВРП, связанной с мобильными источниками, выбросами твердых веществ, диоксида серы и оксидов азота.

Особенностью 4-го кластера (RPG – 1,78) выступало такое обстоятельство, что в него входил как сам Дальневосточный федеральный округ, так и регионы, его составляющие, за исключением Сахалинской области, и Мурманская область. В рамках данного кластера целесообразны приоритетная реализация мероприятий и осуществление инвестиций, связанных со снижением выбросов диоксида серы, оксидов азота, а также твердых веществ.

Самое низкое, причем отрицательное, значение RPG было отмечено в регионах 5-го кластера (–0,75), в который входили Ненецкий и Ямало-Ненецкий автономные округа и Красноярский край, обладавшие значительно отличными значениями ГК и расчетных индикаторов. Здесь фиксировалась высокая социальная нагрузка эмиссии ПГ. В регионах данного кластера приоритетными направлениями должны выступать мероприятия и инвестиции, связанные со снижением всех выбросов в атмосферу, особенно углеводорода, включая ЛОС, а также оксидов азота и углерода.

6-й кластер (RPG – 2,3) характеризовался максимальными значениями выбросов от передвижных источников. Поэтому в регионах этого кластера приоритетное внимание следует уделять данным источникам выбросов в атмосферу.

Результаты проведенного исследования могут стать основой индикативного планирования снижения уровня загрязнения атмосферы и декарбонизации экономики Российской Федерации.

Литература

1. Бертош Е.И., Наркевич И.П. Влияние сельскохозяйственного производства на выбросы парниковых газов и направления их сокращения в Республике Беларусь // Журнал Белорусского государственного университета, Экология. 2024. № 1. С. 93–101. DOI: 10.46646/2521-683X/2024-1-93-101.
2. Воронков Л.С. Климатические аспекты энергетической стратегии ЕС // Научно-аналитический вестник ИЕ РАН. 2024. № 1. С. 64–78. DOI: 10.15211/vestnikieran120246478.
3. Джаббаров Н.И., Мишанов А.П., Добринов А.В. Прогнозирование выбросов парниковых газов в растениеводстве от уровня применяемых технологий // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 1(118). С. 70–82. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82.
4. Ефимова Е.Г., Мальцев А.А., Чупина Д.А. «Зеленая» повестка в современной практике стран и регионов: в поисках единого подхода // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2023. № 39(1). С. 55–72. DOI: 10.21638/spbu05.2023.103.
5. Кузнецова А.Р., Кузнецов А.И. Тенденции выбросов парниковых газов в Российской Федерации // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. 2024. № 1(34). С. 104–132. DOI: 10.24412/2949-4052-2024-1-104-132.
6. Основные показатели охраны окружающей среды. 2023. Стат. бюлл. / Росстат. М., 2023. 110 с.
7. Основные показатели охраны окружающей среды. 2021. Стат. бюлл. / Росстат. М., 2021. 114 с.
8. Петров С.П. Применение методики МГЭИК для оценки пространственного распределения выбросов CO₂ в черной металлургии России // Проблемы прогнозирования. 2024. № 1(202). С. 81–89. DOI: 10.47711/0868-6351-202-81-89.
9. Применение цифровых технологий для снижения углеродного следа в животноводстве / Г.С. Клычова, А.Р. Закирова, А.Р. Юсупова и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. № 1(65). С. 122–128. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-122-128.
10. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2023: Стат. сб. / Росстат. М., 2023. 1126 с.
11. Регионы России. Социально-экономические показатели. Приложение [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Pril_Region_Pokaz_2023.rar.
12. Рябов И.Ю., Понькина Е.В., Строков А.С. Перспективы углеродной нейтральности в сельском хозяйстве России по сценарию SSP: анализ на уровне страны и региона // Пространственная экономика. 2024. № 1(20). С. 26–62. DOI: 10.14530/se.2024.1.026-062.
13. Шевелева Н.А., Череповицына А.А., Данилин К.П. Оценка прогресса декарбонизации российских нефтегазовых компаний // Проблемы прогнозирования. 2024. № 3(204). С. 118–129. DOI: 10.47711/0868-6351-204-118-129.
14. Luo S., Hu W., Liu W. et al. Study on the decarbonization in China's power sector under the background of carbon neutrality by 2060. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, vol. 166, 112618. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112618.
15. Rivera-Marín A., Alfonso-Solar D., Vargas-Salgado C., Català-Mortes S. Methodology for estimating the decarbonization potential at the neighborhood level in an urban area: Application to La Carrasca in Valencia city-Spain. Journal of Cleaner Production, 2023, vol. 417, 138087. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138087.
16. Yu Z., Wan Y. Can the Growth of the Digital Economy Be Beneficial for Urban Decarbonization? A Study from Chinese Cities. Sustainability, 2023, vol. 15, 2260. DOI: 10.3390/su15032260.

ДАНИЛОВ ИВАН ПЕТРОВИЧ – доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (dip41@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6837-5381>).

ЛАДЫКОВА ТАТЬЯНА ИВАНОВНА – кандидат экономических наук, доцент кафедры макроэкономической политики и стратегического управления, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва; доцент кафедры государственного и муниципального управления и региональной экономики, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ladykova@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3125-8429>).

Ivan P. DANILOV, Tatiana I. LADYKOVA

CLUSTER ANALYSIS OF ATMOSPHERIC EMISSIONS IN THE RUSSIAN FEDERATION:
A REGIONAL ASPECT

Key words: greenhouse gases, decarbonization, regional economy, cluster analysis, indicative planning.

The article presents the main results of studying greenhouse gas emission processes in Russia. The relevance of the research lies in the fact that its results can become the basis for indicative planning for reducing atmospheric pollution and decarbonizing the economy of the Russian Federation.

The purpose of the study is to identify the main directions for reducing atmospheric air pollution in the constituent entities of the Russian Federation.

Materials and methods. The information basis of the study consists of statistical data from Rosstat for the period 2000–2022 for 82 subjects of the Russian Federation, federal districts, the cities of Moscow, St. Petersburg, Sevastopol and the Russian Federation as a whole. In the course of the study, correlation and cluster analysis ("k-means" methods and determining the medians of each cluster) were performed, as well as the principal component method.

Results. Based on 14 calculated indicators, 5 main components characterizing atmospheric pollution were formed: the 1st is the economic component, the 2nd is the social component, the 3rd is the contribution made by mobile sources, the 4th is predominance of solids and carbon monoxide in emissions, the 5th is social and economic consequences of Sulphur dioxide emissions as well as economic ones – those of nitrogen oxides and hydrocarbon emission. The study substantiated a model for analyzing the social and economic consequences of greenhouse gas emissions, which assessed the economies of the federal districts of the Russian Federation and the subjects of the Volga Federal District. The results also gave us the opportunity to identify 6 clusters, including the subjects of the Russian Federation, which differ in different levels of the main aspects of greenhouse gas emissions.

Conclusions. For the regions assigned to cluster 1, it is necessary to plan implementing the measures and investments aimed at reducing hydrocarbon emissions. For the regions of cluster 2, which are characterized by the most unfavorable indicators of the social burden of atmospheric pollution, the priority goal is to reduce carbon monoxide emissions. In the regions of cluster 3, which are the most prosperous, the strategy for reducing all types of emissions should be continued. Measures for the regions included in cluster 4 should be aimed at reducing emissions of sulfur dioxide, nitrogen oxides and solids. In the regions of cluster 5, it is necessary to ensure reduction of all types of atmospheric emissions, paying special attention to reducing emissions of hydrocarbons, nitrogen oxides and carbon monoxide. In the regions of cluster 6, it is necessary to reduce emissions into the atmosphere from mobile sources of pollution. The practical significance of the presented research is due to the fact that the proposed model will make it possible to make effective management decisions when developing strategies and programs for emission-free development and decarbonization of the economy of the subjects of the Russian Federation.

References

1. Bertosh E.I., Narkevich I.P. *Vliyaniye sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva na vybrosoy parnikovyykh gazov i napravleniya ikh sokrashcheniya v Respublike Belarus'* [The impact of agricultural production on the emissions of greenhouse gases and the directions to reduce them in the Republic of Belarus]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta, Ekologiya*, 2023, no. 4, pp. 93–101. DOI: 10.46646/2521-683X/2024-1-93-101.
2. Voronkov L.S. *Klimaticheskie aspekty energeticheskoi strategii ES* [Climate aspects of the EU energy strategy]. *Nauchno-analiticheskii vestnik IE RAN*, 2024, no. 37(1), pp. 64–78. DOI: 10.15211/-vestnikieran120246478.
3. Dzhabborov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V. *Prognozirovaniye vybrosov parnikovyykh gazov v rastenievodstve ot urovnya primenyaemykh tekhnologii* [Forecasting of greenhouse gas emissions in crop production depending on applied technology level]. *AgroEkoInzheneriya*, 2024, no. 1(118), pp. 70–82. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82.

4. Efimova E.G., Mal'tsev A.A., Chupina D.A. «Zelenaya» povestka v sovremennoi praktike stran i regionov: v poiskakh edinogo podkhoda [Green agenda in the modern practice of countries and regions: In search of a unified approach]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika*, 2023, no. 39(1), pp. 55–72. DOI: 10.21638/spbu05.2023.103.
5. Kuznetsova A.R., Kuznetsov A.I. *Tendentsii vybrosov parnikovyykh gazov v Rossiiskoi Federatsii* [Trends in greenhouse gas emissions in the Russian Federation]. *Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnnykh resursov*, 2024, no. 1(34), pp. 104–132. DOI: 10.24412/2949-4052-2024-1-104-132.
6. *Osnovnye pokazateli okhrany okruzhayushchei sredy. 2023. Stat. byll.* [Key environmental protection indicators. 2023. Statistical bulletin]. Moscow, Rosstat Publ., 2023, 110 p.
7. *Osnovnye pokazateli okhrany okruzhayushchei sredy. 2021. Stat. byll.* [Key environmental protection indicators. 2021. Statistical bulletin]. Moscow, Rosstat Publ., 2021, 114 p.
8. Petrov S.P. *Primenenie metodiki MGEIK dlya otsenki prostranstvennogo raspredeleniya vybrosov CO₂ v chernoi metallurgii Rossii* [Application of the IPCC Methodology to Assess the Spatial Distribution of CO₂ Emissions in Russian Ferrous Metallurgy]. *Problemy prognozirovaniya*, 2024, no. 1(202), pp. 81–89. DOI: 10.47711/0868-6351-202-81-89.
9. Klychova G.S., Zakirova A.R., Yusupova A.R. et al. *Primenenie tsifrovyykh tekhnologii dlya snizheniya uglernogo sleda v zhivotnovodstve* [The use of digital technologies to reduce the carbon footprint in animal husbandry]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2023, no. 1(65), pp. 122–128. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-122-128.
10. *Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli. 2023: Stat. sb.* [Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2023. Statistical bulletin]. Moscow, Rosstat Publ., 2023, 1126 p.
11. *Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli. Prilozhenie* [Regions of Russia. Socio-economic indicators. Appendix]. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Pril_Region_-_Pokaz_2023.rar.
12. Ryabov I.Yu., Pon'kina E.V., Stokov A.S. *Perspektivy uglernoi neutral'nosti v sel'skom khozyaistve Rossii po stseneriyam SSP: analiz na urovne strany i regiona* [Prospects of Carbon Neutrality in Russian Agriculture According to SSP Scenarios: Analysis at the National Level and in a Region]. *Prostranstvennaya ekonomika*, 2024, no. 20(1), pp. 26–62. DOI: 10.14530/se.2024.1.026-062.
13. Sheveleva N.A., Cherepovitsyna A.A., Danilin K.P. *Otsenka progressa dekarbonizatsii rossiiskikh neftegazovykh kompanii* [Assessment of the progress of decarbonization of Russian oil and gas companies]. *Problemy prognozirovaniya*, 2024, no. 3(204), pp. 118–129. DOI: 10.47711/0868-6351-204-118-129.
14. Luo S., Hu W., Liu W. et al. Study on the decarbonization in China's power sector under the background of carbon neutrality by 2060. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 166, 112618. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112618.
15. Rivera-Marín A., Alfonso-Solar D., Vargas-Salgado C., Català-Mortes S. Methodology for estimating the decarbonization potential at the neighborhood level in an urban area: Application to La Carrasca in Valencia city-Spain. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 417, 138087. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138087.
16. Yu Z., Wan Y. Can the Growth of the Digital Economy Be Beneficial for Urban Decarbonization? *A Study from Chinese Cities. Sustainability*, 2023, vol. 15, 2260. DOI: 10.3390/su15032260.

IVAN P. DANILOV – Doctor of Economics Sciences, Professor, Chief Researcher, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (dip41@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6837-5381>).

TATIANA I. LADYKOVA – Candidate of Economics Sciences, Associate Professor, Department of Macroeconomic Policy and Strategic Management, Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow; Associate Professor, Department of State and Municipal Management and Regional Economy, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ladykova@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3125-8429>).

Формат цитирования: Данилов И.П., Ладькова Т.И. Кластерный анализ выбросов в атмосферу в Российской Федерации: региональный аспект [Электронный ресурс] // *Oeconomia et Jus*. 2025. № 3. С. 30–44. URL: <http://oecomia-et-jus.ru/single/2025/3/3>. DOI: 10.47026/2499-9636-2025-3-30-44.