

Пространственно-временной анализ климатических условий рассеивающих факторов в центральной части Русской равнины

Л. М. Акимов , Е. Л. Акимов

Воронежский государственный университет, Российская Федерация
(394018, г. Воронеж, Университетская пл. 1)

Аннотация. Цель – изучение пространственно-временных особенностей основных факторов, определяющих рассеивание примесей в атмосфере на территории центральной части Русской равнины.

Материалы и методы исследования основаны на геоинформационном анализе данных температурно-ветрового зондирования атмосферы аэрологических станций, расположенных в центральной части Русской равнины.

Результаты и обсуждение. Установлены пространственно-временные закономерности распределения слабых (штилевых) ветров (0-1 м/с), а также приземных и приподнятых инверсий в холодный и теплый периоды и за год в целом.

Выводы. Доказана доминирующая роль циркуляции атмосферы в пространственно-временных закономерностях распределения основных факторов рассеивания поллютантов в атмосфере, а также существенное значение физико-географических факторов территории. В течение года, на западе центральной части Русской равнины вероятность образования приземной инверсии колеблется в диапазоне 30-35 % и обусловлена радиационным выхолаживанием подстилающей поверхности. На востоке центральной части Русской равнины вероятность образования приземной инверсии достигает 40-45 % из-за влияния Сибирского антициклона зимой. Преобладание устойчивого состояния атмосферы, с частыми инверсиями, наблюдается в зимний период.

Ключевые слова: поллютанты, загрязнение атмосферы, инверсия, слабый ветер, турбулентный обмен, барический градиент.

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>.

Для цитирования: Акимов Л. М., Акимов Е. Л. Пространственно-временной анализ климатических условий рассеивающих факторов в центральной части Русской равнины // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2025, № 3, с. 127-135. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/127-135>

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера является одной из основных систем окружающей среды, состоящая из механической смеси газов, и ее чистота – необходимое условие сохранения здоровья людей. Поэтому проблемы, связанные с загрязнением атмосферного воздуха, актуальны в глобальном, мировом масштабе и в значительной степени согласуются с национальными интересами Российской Федерации в оздоровлении экологической обстановки.

Исследованию проблемы загрязнения атмосферного воздуха и изучению законов распространения примесей в нем уделяется все большее внимание. Разработан национальный проект «Экология», в рамках которого утвержден федеральный проект «Чистый воздух», провозглашающие уменьшение совокупного объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, в наиболее загрязненных городах не менее, чем на 20 %.

Для реализации перечисленных экологических проектов направлены научные исследования по выявлению природных и антропогенных факторов, способо-

ствующих повышению концентрации поллютантов в атмосфере. К наиболее значимым природным факторам, влияющим на интенсивное загрязнение воздуха, относятся аномальные неблагоприятные метеорологические условия. Установлено [1-3], что наибольшее влияние на рассеивание примесей в атмосфере оказывает режим ветра и температуры, в особенности ее стратификация.

Изучению данного вопроса посвящено большое количество исследований как российских, так и зарубежных ученых. В частности, установлено, что при низких источниках выбросов повышенный уровень загрязнения воздуха отмечается при слабых (штилевых) ветрах за счет скопления примесей в приземном слое. Э. Ю. Безуглой [4-6] установлено, что при слабом (штилевом) ветре со скоростью 0-1 м/с концентрация примесей на 30-70 % выше, чем при других скоростях. При наличии штилевого слоя от поверхности земли до уровня 30 м максимальная концентрация примеси от источника высотой 100-150 м увеличивается примерно

на 80 % по сравнению с концентрацией при отсутствии штиля [9-11].

По результатам исследований ряда авторов [3, 6, 8-12] установлено, что в случае площадных источников концентрации загрязняющих веществ при инверсиях могут увеличиться в 5-10 раз по сравнению с их значениями в отсутствие инверсий. Поэтому в городе при инверсии наблюдается заметное увеличение концентраций примесей в воздухе.

В работах Л. М. Акимова с соавторами [1-3] изучены механизмы влияния метеорологических параметров и показателей состояния устойчивости атмосферы на концентрацию поллютантов в воздухе.

Выбросы вредных веществ источниками загрязнения носят неоднородный характер, с кратковременным их увеличением в отдельные периоды времени, образуя фон антропогенных загрязнений атмосферы. Увеличение выбросов при неблагоприятных климатических условиях для их рассеивания, способствует повышению среднего уровня загрязнения, что создает сложную экологическую ситуацию на территории. При этом существенное влияние на формирование уровня загрязненности атмосферного воздуха оказывают физико-географические условия территории, особенно формы рельефа, ландшафт, а также циркуляция атмосферы [2].

Учитывая тот факт, что климатические и антропогенные факторы, формирующие уровень загрязнения атмосферного воздуха подвержены, временными изменениям, возникает потребность постоянного изучения их формирования и распространения.

Целью данной статьи является изучение пространственно-временных особенностей основных факторов, определяющих рассеивание примесей в атмосфере на территории центральной части Русской равнины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для предотвращения повышенных уровней загрязнения атмосферного воздуха наиболее перспективными являются методы, учитывающие особенности физико-географического района и климатологическую информацию о повторяемости неблагоприятных условий для рассеивания веществ в атмосфере.

К основным факторам, определяющим рассеивание примесей, относится стратификация атмосферы, характеризующая распределение температуры с высотой и оцениваемая вертикальным температурным градиентом γ на каждые 100 метров высоты по формуле:

$$\gamma = -\frac{\Delta T}{\Delta z} = -\frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \cdot 100 \text{ } (\text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ } m) \quad (3)$$

где T_2 и T_1 – температура воздуха на уровне высоты z_2 и z_1 – соответственно; 100 – коэффициент перевода в стандартное значение; знак минус перед дробью указывает на понижение температуры с высотой.

В случае если наблюдается понижение температуры с высотой ($\gamma > 0^{\circ}\text{C}/100 \text{ } m$), такое состояние атмосферы называется конвекцией. При постоянстве температуры $\gamma = 0^{\circ}\text{C}/100 \text{ } m$ – изотермия, при повышении температуры воздуха с высотой ($\gamma < 0^{\circ}\text{C}/100 \text{ } m$) – инверсия тем-

пературы. Если повышение температуры начинается непосредственно от поверхности земли, инверсию называют приземной, если же с некоторой высоты над поверхностью земли, то – приподнятой. Инверсии затрудняют вертикальный воздухообмен и являются задерживающим слоем атмосферы, при этом в приземном слое атмосферы создаются опасные условия загрязнения, так как инверсионный слой ограничивает подъем выбросов и способствует их накоплению в приземном слое.

Э. Ю. Безуглая в работе [6] представила результаты анализа влияния инверсий на концентрацию в воздухе пыли, сажи, окислов азота, окиси углерода и сернистого газа по данным наблюдений в ряде городов. Ею установлено, что инверсии температуры в нижней тропосфере определяются в основном двумя факторами: охлаждением земной поверхности вследствие радиационного излучения и адvection теплого воздуха на холодную подстилающую поверхность; часто они связаны с охлаждением приземного слоя за счет затрат тепла на испарение воды или таяние снега и льда [5]. Формированию инверсий способствуют также нисходящие движения в антициклонах (инверсии сжатия) и сток холодного воздуха в пониженные части рельефа.

Основным материалом для получения климатических характеристик явились результаты температурно-ветрового зондирования атмосферы 18 аэрологических станций за 50-летний период с 1973 по 2023 год. Данные передаются ежедневно, в сроки 00.00 и 12.00 часов, в коде КН – 04 (FN-35) и размещены на сайте Гидрометцентра России (<http://meteoinfo.ru>). Для изучения режима слабых (штилевых) ветров были использованы данные о повторяемости ветра скоростью 0-1 м/с у поверхности земли по данным аэрологических станций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Слабые (штилевые) ветры (0-1 м/с) за счет турбулентного перемешивания, обусловленного разностью плотности неоднородно прогретого воздуха, оказывают наиболее существенное влияние на перенос и рассеивание примесей в атмосфере.

При рассмотрении вопроса формирования полей слабых ветров (0-1 м/с) важную роль играет горизонтальный барический градиент, определяемый как синоптической ситуацией, так и плотностью воздуха, зависящей от температуры. Наиболее благоприятная синоптическая ситуация, способствующая формированию полей слабых ветров (0-1 м/с) концентрируется в центре антициклона, либо на оси гребня, а также в седловине, где наблюдается большое расстояние между изобарами. С увеличением температуры воздуха, при прочих неизменных условиях, согласно уравнению состояния атмосферы, плотность воздуха уменьшается, что влечет уменьшение силы барического градиента, следовательно, повторяемость слабых ветров летом выше, чем зимой, т.е. наблюдается выраженный годовой ход с максимумом летом и минимумом зимой. Проведенный анализ позволил установить, что наибольшая повторяемость слабых ветров (0-1 м/с) в Воронеже

же наблюдается в августе и обусловлена «наложением» двух факторов – термического и циркуляционного. Пространственное распределение многолетней (1973–

2023 годы) повторяемости слабых ветров (0-1 м/с) за год на территории центральной части Русской равнины представлено на рисунке 1.



Рис. 1. Повторяемость слабых ветров (0-1 м/с) за год (1973-2023 годы)
[Fig. 1. Frequency of weak winds (0-1 m/s) per year (1973-2023)]

Анализ рисунка 1 позволил установить увеличение повторяемости слабых ветров на территории центральной части Русской равнины с северо-востока (Казань – 14 %, Самара – 14 %, Пенза – 15 %) на юго-запад (Харьков – 21 %, Брянск – 22 %), что объясняется влиянием циркуляционного фактора на территории в летний период. Зимой на исследуемой территории повторяемость слабых ветров (0-1 м/с) невелика, т. к. восточная часть находится под влиянием Сибирского антициклона, а с юго-запада на него оказывают воздействие «черноморские» циклоны, что способствует увеличению горизонтальных барических градиентов и увеличению скорости ветра и созданию «метелевой» ситуации. Летом на месте деятельности Сибирского антициклона происходит смена знака циркуляции и формирование Азиатского минимума. Восточная часть Русской равнины оказывается под влиянием его тыловой части, способствующей проникновению холодных ветров с севера и увеличению интенсивности вертикальных движений ветра, т.е. «неустойчивости» атмосферы и разрушению условий формирования инверсий. Юго-западная часть территории Русской равнины находится под воздействием гребня Азорского антициклона. Усиление влияния Азорского антициклона наблюдается в основном в середине июля – августе, что приводит к увеличению повторяемости слабых (штилевых) ветров. Годовая повторяемость слабых (штилевых) ветров (0-1 м/с) за период с 1973 по 2023 год на

большей части территории центральной части Русской равнины находится в пределах 17-19 %.

Повторяемость инверсий рассчитана в процентах от общего числа радиозондовых наблюдений для каждой аэрологической станции центральной части Русской равнины по всем срокам наблюдения за период с 1973 по 2023 год. Анализ проводился отдельно для теплого и холодного периодов по центральным месяцам сезонов, а также в целом за год. Результаты анализа повторяемости приземной инверсии за январь представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что доминирующее влияние на формирование приземных инверсий в январе на территории центральной части Русской равнины оказывает Сибирский антициклон. Влияние Сибирского антициклона простирается в широтном направлении, с востока на запад на тысячу километров от Самары (75 %), Балашова (65 %) до Воронежа (58 %). Станции, расположенные западнее Воронежа (Курск – 42 %), находятся под динамическим влиянием воздуха с Атлантики, способствующего увеличению скорости ветра и разрушению инверсий. Выход «черноморских» циклонов на юге также способствует увеличению барического градиента, увеличению ветра и разрушению инверсий. В среднем вероятность приземных инверсий на западе (Брянск – 31 %) и на юге Русской равнины (Волгоград – 30 %) составляет 25-30 %.

Результаты анализа повторяемости приземных инверсий в летний период представлены на рисунке 3.

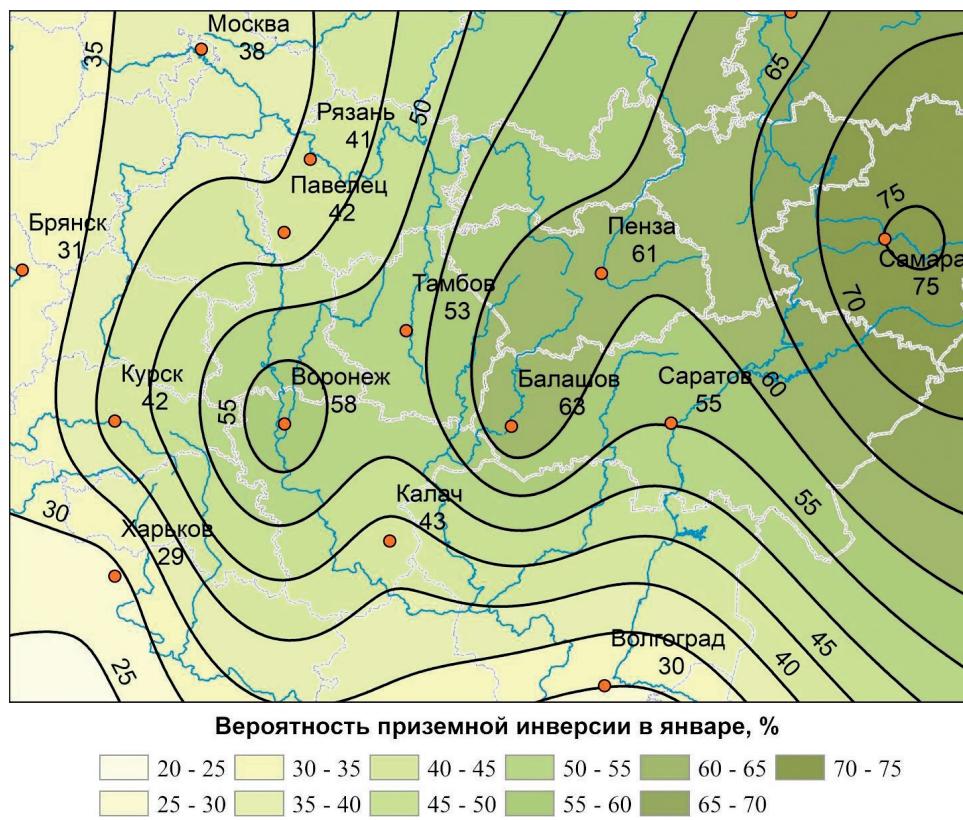


Рис. 2. Повторяемость приземных инверсий в январе (1973-2023 годы)
 [Fig. 2. Frequency of surface inversions in January (1973-2023)]



Рис. 3. Повторяемость приземных инверсий в июле (1973-2023 годы)
 [Fig. 3. Frequency of surface inversions in July (1973-2023)]

Анализ рисунка 3 позволил установить, что большая часть территории центра Русской равнины летом находится под действием умеренной воздушной массы с Атлантики. Образование приземных инверсий летом, на западной и северной частях рассматриваемой территории, происходит за счет радиационного выхолаживания подстилающей поверхности. Вероятность образования приземных инверсий на этой части территории Русской равнины составляет 30-40 % (Брянск – 30 %, Рязань – 40 %, Москва – 39 %, Казань – 39 %). Ось гребня Азорского антициклона, оказывающего серьезное влияние на юго-восточные районы Русской равнины, расположена в квазимеридиональном направлении по линии Астрахань (60 %), Волгоград (53 %), Балашов (51 %). Гребень Азорского антициклона способствует формированию «инверсий сжатия» за счет адиабатического нагрева опускающегося воздуха.

Средняя многолетняя (1973-2023 годы) повторяемость приземных инверсий за год представлена на рисунке 4.

На годовое распределение повторяемости приземных инверсий оказывается влияние как зимних (Сибирский антициклон), так и летних (гребень Азорского антициклона) факторов, с доминированием условий зимнего периода. Распределение вероятности образования приземной инверсии делит территорию Русской равнины пополам по линии Калач – Тамбов – Рязань. Западнее этой линии вероятность приземной инверсии за год составляет 36-38 % (Воронеж (37 %), Брянск (36 %),

Харьков (39 %)), восточнее – Балашов (41 %), Самара (45 %), Казань (43 %).

Большое значение на уровень загрязнения атмосферного воздуха оказывает приподнятая инверсия. М. Е. Берлинд [7] отмечал существенное влияние приподнятых инверсий на отклонения в распределении коэффициента обмена с высотой. В случае наличия приподнятой инверсии резко ослабевает обмен с высотой. Наличие задерживающего слоя с ослабленной турбулентностью над одиночным источником приводит к увеличению наземной концентрации поллютантов в 1,5-2 раза, а иногда и больше. R. R. Dickson [11] при наблюдении за пульсациями ветра с высотой отмечал, что в инверсионных слоях резко ослабляется турбулентный обмен.

Следует отметить, что механизм образования приподнятых инверсий разнообразен. Они могут возникнуть вследствие разрушения приземных инверсий при прогреве подстилающей поверхности. Также большой вклад в повторяемость приподнятых инверсий вносят «инверсии сжатия», образующиеся на некоторой высоте от поверхности земли. Наибольшую повторяемость имеют приподнятые инверсии, связанные с адвекцией тепла, особенно на линии теплого фронта.

Анализ повторяемости приподнятой инверсии осуществлялся до уровня высоты изобарической поверхности Ат-925 гПа, что в среднем соответствовало начальной высоте слоя выше поверхности земли до 650-750 м, в соответствии с требованиями «Руководства по прогнозу загрязнения воздуха РД 52.04.306-92» [8].



Рис. 4. Повторяемость приземных инверсий за год (1973-2023 годы)

[Fig. 4. Frequency of surface inversions per year (1973-2023)]



Рис. 5. Повторяемость приподнятых инверсий в январе (1973-2023 годы)
[Fig. 5. Frequency of elevated inversions in January (1973-2023)]



Рис. 6. Повторяемость приподнятых инверсий в июле (1973-2023 годы)
[Fig. 6. Frequency of elevated inversions in July (1973-2023)]

Результаты анализа повторяемости приподнятых инверсий в зимний период представлены на рисунке 5.

Пространственное распределение приподнятых инверсий в январе, представленное на рисунке 5, хо-

рошо отображает траекторию и ареал влияния «черноморских» циклонов на территорию центральной части Русской равнины, находящуюся под влиянием восточной периферии Сибирского антициклона. Вероятность

появления приподнятой инверсии в центральной части рассматриваемой территории составляет 41-45 %, в то время как в районе действия Сибирского антициклона (Самара) она уменьшается до 31 %, что свидетельствует об интенсивных нисходящих движениях воздуха, способствующих образованию приземных инверсий.

Летом (рис. 6), распределение вероятности появления приподнятых инверсий на территории центральной части Русской равнины более равномерно и находится в пределах 6-9 %. Наибольшая повторяемость приподнятых инверсий наблюдается на северо-востоке исследуемой территории, что совпадает с траекторией циклонов умеренных широт в летнее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил установить, что наибольшая повторяемость слабых (шилевых) ветров (0-1 м/с) на территории центральной части Русской равнины обусловлена «наложением» двух факторов – термическим и циркуляционным. Доминирующим фактором в формировании полей слабых (шилевых) ветров (0-1 м/с) в центральной части Русской равнины является циркуляция атмосферы.

Зимой на исследуемой территории повторяемость слабых ветров (0-1 м/с) невелика и обусловлена в основном синоптической ситуацией, а, именно, взаимодействием Атлантических и Черноморских циклонов и Сибирского антициклона.

Летом, с увеличением температуры, плотность воздуха уменьшается, ослабевают силы барического градиента, следовательно, повторяемость слабых ветров значительно возрастает. Существенное увеличение слабых ветров наблюдается на юге территории центральной части Русской равнины, находящейся под воздействием гребня Азорского антициклона. Влияние термического фактора и циркуляции атмосферы приводит к увеличению повторяемости слабых (шилевых) ветров до больших значений (Харьков – 21 %, Брянск – 22 %).

Годовая повторяемость слабых (шилевых) ветров (0-1 м/с), в большей части территории центральной части Русской равнины находится в пределах 17-19 %.

В январе на формирование приземных инверсий на территории центральной части Русской равнины оказывает Сибирский антициклон, влияние которого простирается в широтном направлении, с востока на запад от Самары (75 %), Балашова (65 %) до Воронежа (58 %).

Образование приземных инверсий летом, в западной и северной части территории Русской равнины, происходит за счет радиационного выхолаживания подстилающей поверхности. Вероятность образования приземных инверсий в этой части составляет 30-40 % (Брянск – 30 %, Рязань – 40 %, Москва – 39 %, Казань – 39 %). На юго-восточные районы Русской равнины летом оказывает серьезное влияние ось гребня Азорского антициклона (Астрахань (60 %), Волгоград (53 %), Балашов (51 %)). Гребень Азорского антициклона спо-

собствует формированию «инверсий сжатия» за счет адиабатического нагрева опускающегося воздуха.

В течение года на западе центральной части Русской равнины за счет радиационного выхолаживания подстилающей поверхности вероятность образования приземной инверсии колеблется в диапазоне 30-35 %, а на востоке – 40-45 % из-за влияния Сибирского антициклона зимой.

Вероятность появления приподнятой инверсии в центральной части рассматриваемой территории зимой составляет 41-45 %, а летом находится в пределах 6-9 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов Л.М. Анализ временного распределения средних концентраций антропогенных примесей в г. Воронеже с учетом климатических показателей // *сборник материалов III юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры экологии Владимирского государственного университета «Экология регионов»*, 2010, с. 8-12.
2. Акимов Л. М. Якушев А. Б., Куролап С. А. Геэкологическая оценка загрязнения воздушного бассейна города Воронежа автотранспортом в зависимости от состояния атмосферы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2011, № 2, с. 158-165.
3. Акимов Л.М., Виноградов П.М., Акимов Е.Л. Анализ влияния функционально-планировочной структуры города на загрязнение воздушного бассейна // *Экологическая оценка и картографирование состояния городской среды*, 2014, с. 55-65.
4. Безуглая Э.Ю. К определению потенциала загрязнения воздуха // *Труды ГГО*, 1968, вып. 234, с. 69-79.
5. Некоторые результаты изучения инверсий температуры для оценки потенциала загрязнения воздуха на Европейской территории СССР / Э.Ю. Безуглая, В.Г. Волошин, В.И. Дудина, Л.И. Елекоева, З.И. Макроусова, Т.М. Пиастро // *Труды ГГО*, 1975, вып. 352, с. 78-92.
6. Безуглая Э.Ю., Сонькин Л.Р. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха в городах Советского Союза // *Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы*, 1971, с. 241-252.
7. Берлинд М.Е. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Ленинград. Гидрометеоиздат, 1985. 272 с.
8. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха РД 52.04.306-92 РД 52.04.78-86. Методические указания по прогнозированию загрязнения воздуха с учетом метеорологических условий.
9. Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фонового загрязнения атмосферы в городах // *Труды ГГО*, 1974, вып. 314, с. 42-51.
10. Шевчук И.А., Веденская Л.И., Володьевич Т.Г. Повторяемость метеорологических условий, способствующих увеличению загрязнения приземного слоя атмосферы в г. Новосибирске // *Труды Новосибирского региона ГМЦ*, 1969, вып. 2, с. 106-109.
11. Dickson R.R. Meteorological factors affecting particulate air pollution of a city // *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1961, vol. 42, no. 8, pp. 556-560.
12. Newall U.E., Eaves A. The effect of wind speed and rainfall on the concentration of sulphur dioxide in the atmosphere // *J. Air and Water Pollut.*, 1962, vol. 6, no. 5.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 10.06.2024
Принята к публикации: 01.09.2025

Spatio-Temporal Analysis of the Climatic Conditions of Dispersive Factors in the Central Part of the Russian Plain

L. M. Akimov[✉], E. L. Akimov

*Voronezh State University, Russian Federation
(1, Universitetskaya Sq., Voronezh, 394018)*

Abstract. The purpose is to study the spatial and temporal characteristics of the main factors determining the dispersion of impurities in the atmosphere in the territory of the central part of the Russian Plain.

The materials and methods of the research are based on the geoinformation analysis of temperature-wind sounding data from aerological stations located in the central part of the Russian Plain.

Results and discussion. Spatial-temporal patterns for the distribution of weak (stile) winds (0-1 m/s), as well as ground and elevated inversions during cold and warm periods and throughout the year, have been established.

Conclusions. The dominant role of atmospheric circulation in the spatio-temporal patterns of distribution of the main factors of pollution dispersion in the atmosphere, as well as the significant importance of physical and geographical factors of the territory, has been proven. During the year, in the west of the central part of the Russian Plain, the probability of ground inversion formation varies within 30-35 % and is due to the radiation cooling of the underlying surface. In the east of the central part of the Russian Plain, the probability of ground inversion reaches 40-45 % due to the influence of the Siberian anticyclone in winter. The predominance of the stable state of the atmosphere, with frequent inversions, is observed in winter.

Key words: Pollutants, air pollution, inversion, low winds, turbulent exchange, pressure gradient.

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>.

For citation: Akimov L. M., Akimov E. L. Spatio-Temporal Analysis of the Climatic Conditions of Dispersive Factors in the Central Part of the Russian Plain. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geokologiya*, 2025, no. 3, pp. 127-135 (In Russ) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/127-135>

REFERENCES

1. Akimov L. M. Analiz vremennogo raspredelenija srednih koncentracij antropogennyh primezej v g. Voronezhe s uchetom klimaticheskikh pokazatelej [Analysis of the temporal distribution of average concentrations of anthropogenic impurities in Voronezh, taking into account climatic indicators]. *Sbornik materialov III jubilejnnoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashchennoj 20-letiju kafedry jekologii Vladimirskogo gosudarstvennogo universiteta «Jekologija regionov»*, 2010, pp. 8-12. (In Russ.)
2. Akimov L. M. Jakushev A. B., Kirolap S. A. Geoekologicheskaja ocenka zagrjaznenija vozdušnogo bassejna goroda Voronezha avtotransportom v za-visimosti ot sostojanija atmosfery [Geoecological assessment of pollution of the Voronezh city air basin by motor vehicles depending on the state of the atmosphere]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geokologija*, 2011, no. 2, pp. 158-165. (In Russ.)
3. Akimov L. M., Vinogradov P. M., Akimov E. L. Analiz vlijaniya funk-cional'no-planirovochnoj struktury goroda na zagrjaznenie vozdušnogo bassejna [Analysis of the impact of the functional planning structure of the city on air basin pollution]. *Jekologicheskaja ocenka i kartografirovanie sostojanija gorodskoj sredy*, 2014, pp. 55-65. (In Russ.)
4. Bezuglaja Je. Ju. K opredeleniju potenciala zagrjaznenija vozduha [To determine the potential of air pollution]. *Trudy GGO*, 1968, v. 234, pp. 69-79. (In Russ.)
5. Nekotorye rezul'taty izuchenija inversij temperatury dlja ocenki potenciala zagrjaznenija vozduha na Evropejskoj territorii SSSR [Some results of studying temperature inversions to assess the potential of air pollution in the European territory of the USSR] / Je. Ju. Bezuglaja, V. G. Voloshin, V. I. Dudina, L. I. Elekoeva, Z. I. Makrousova, T. M. Piastro. *Trudy GGO*, 1975, v. 352, pp. 78-92. (In Russ.)
6. Bezuglaja Je. Ju., Son'kin L. R. Vlijanie meteorologicheskikh uslovij na zagrjaznenie vozduha v gorodah Sovetskogo Sojuza [The influence of meteorological conditions on air pollution in cities of the Soviet Union]. *Meteorologicheskie aspekty zagrjaznenija atmosfery*, 1971, pp. 241-252. (In Russ.)
7. Berljand M. E. *Prognoz i regulirovanie zagrjaznenija atmosfery* [Forecast and regulation of atmospheric pollution]. Le-ningrad. Gidrometeoizdat, 1985. 272 p. (In Russ.)
8. *Rukovodstvo po prognozu zagrjaznenija vozduha RD 52.04.306-92 RD 52.04.78-86. Metodicheskie ukazanija po prognozirovaniyu zagrjaznenija vozduha s uchetom meteorologicheskikh uslovij* [Air Pollution Forecast Guide RD 52.04.306-92 RD 52.04.78-86. Methodological guidelines for forecasting air pollution, taking into account meteorological conditions].
9. Son'kin L. R. Voprosy prognozirovaniya fonovogo zagrjaznenija atmosfery v gorodah [Issues of forecasting background atmospheric pollution in cities]. *Trudy GGO*, 1974, v. 314, pp. 42-51. (In Russ.)



10. Shevchuk I.A., Vedenskaja L.I., Volodkevich T.G. Povtornojaemost' me-teorologicheskikh uslovij, sposobstvujushhih uvelicheneniju zagrjaznenija pri-zemnogo sloja atmosfery v g. Novosibirsk [The repeatability of meteorological conditions contributing to an increase in pollution of the near-Earth atmosphere in Novosibirsk]. *Trudy Novosibirskogo regiona GMC*, 1969, v. 2, pp. 106-109. (In Russ.)
11. Dickson R.R. Meteorological factors affecting particulate air pollution of a city. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1961, vol. 42, no. 8, pp. 556-560.
12. Newall U.E., Eaves A. The effect of wind speed and rainfall on the concentration of sulphur dioxide in the atmosphere. *J. Air and Water Pollut.*, 1962, vol. 6, no. 5.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 10.06.2024

Accepted: 01.09.2025

Акимов Леонид Мусамудинович

Кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой природопользования Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0749-1976, e-mail: akl63@bk.ru

Акимов Евгений Леонидович

Кандидат географических наук, доцент кафедры природопользования Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4909-4290, e-mail: akimovvsu@gmail.com

Leonid M. Akimov

Cand. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof., Head of the Department of Nature Management, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0749-1976, e-mail: akl63@bk.ru

Evgeny L. Akimov

Cand. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof. at the Department of Nature Management, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4909-4290, e-mail: akimovvsu@gmail.com