

## Математическое описание и расчет влияния погодных условий на концентрацию поллютантов и канцерогенных веществ в атмосфере

Л. М. Акимов , Е. Л. Акимов, А. А. Парт

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

**Аннотация:** Цель – разработка диагностической модели прогноза концентрации основных загрязнителей воздушного бассейна на основе анализа связей концентрации загрязняющих веществ и параметров атмосферы города Воронежа.

**Материалы и методы.** Для математической интерпретации изучаемых процессов были использованы статистические методы исследования анализа связей, регрессионный метод, позволившие наиболее точно отразить сущность процессов загрязнения на фоне изменения атмосферных условий. Обработка численных данных проведена при использовании программного продукта MS Excel. В качестве исходных данных использованы климатические параметры за период 1971–2000 годы по данным научно-прикладного справочника «Климат России» ВНИИГМИ-МЦД, а также использованы ежедневные данные о загрязнении атмосферного воздуха в городе Воронеже и сведения о среднесуточном состоянии атмосферы Воронежского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) за период с 1989 по 2020 годы; общий объем выборки превысил 11000 случаев.

**Результаты и обсуждение.** Выявлены основные закономерности распределения метеорологических параметров атмосферы города Воронежа в различные сезоны года. Установлены климатические параметры основных показателей состояния атмосферы за период 1971–2000 годы. Проведен анализ временного распределения концентраций различных загрязняющих веществ в различные сезоны года и определена величина их корреляционной связи от метеорологических параметров. Установлено, что теснота связи метеорологических параметров с различными загрязняющими веществами различна. Влияние метеорологических параметров на концентрацию различных загрязняющих веществ носит порой противоположный характер, то есть увеличение значений метеорологических параметров для одних загрязняющих веществ увеличивает концентрацию, а для других наоборот – уменьшает.

**Заключение.** В работе решена актуальная практико-ориентированная геоэкологическая задача – разработана диагностическая модель прогноза концентрации основных загрязнителей от параметров атмосферы. Установлены их регрессионные зависимости и дана оценка их достоверности.

**Ключевые слова:** концентрация, загрязняющие вещества, ветер, температура, осадки, влажность, корреляция, регрессия.

**Источник финансирования:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-17-00172.

**Для цитирования:** Акимов Л. М., Акимов Е. Л., Парт А. А. Математическое описание и расчет влияния погодных условий на концентрацию поллютантов и канцерогенных веществ в атмосфере // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2022, № 4, с. 19-36. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/4/19-36>

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших условий обеспечения нормативной чистоты воздушного бассейна в промышленных городах является погодный фактор.

Для обеспечения мониторинга состояния воздушного бассейна в каждом населенном пункте организована служба мониторинга окружающей среды, которая осуществляет наблюдение за метеорологи-

© Акимов Л. М., Акимов Е. Л., Парт А. А., 2022

✉ Акимов Леонид Мусамудинович, e-mail: [akl63@bk.ru](mailto:akl63@bk.ru)



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ческими параметрами и уровнем загрязнения воздушного бассейна. От качества полученных результатов наблюдений о состоянии атмосферного воздуха и степени его загрязнения зависит эффективность проводимых мероприятий по обеспечению чистоты воздушного бассейна. Полученные результаты мониторинга за состоянием воздушной среды и степени ее загрязнения используются для разработки мероприятий по охране чистоты атмосферного воздуха на основе научно-обоснованного подхода. Поэтому исследование взаимосвязей концентраций загрязняющих веществ и параметров погоды является важной и актуальной задачей [1-3, 5].

Целью исследования является разработка диагностической модели прогноза концентрации основных загрязнителей воздушного бассейна на основе анализа связей концентрации загрязняющих веществ от параметров атмосферы города Воронежа.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Воронеж – крупный населенный пункт с широко развитой промышленностью и автотранспортом. Основная доля загрязнения атмосферного воздуха города Воронежа приходится на ТЭЦ–1, котельные, а также на предприятия нефтехимии АО «Воронежсинтезкаучук», ЗАО «Воронежский шинный завод», множественные строительные комплексы и автотранспорт. Все перечисленные предприятия и автомобильный транспорт являются источником загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы ( $SO_2$ ), пылью, оксидом углерода (CO), оксидами азота (NO,  $NO_2$ ). ТЭЦ–1 является источником 45% общего количества сернистых соединений. По результатам исследований Э. Ю. Безуглой [3], Р. Б. Алтынбаева [2], Л. М. Акимова [1], М. Г. Лебедевой, О. В. Крымской [4] и других ученых установлено, что выбросы загрязняющих веществ от автотранспорта составляют около 92% от суммарной величины загрязнителей атмосферы. В результате сжигания топлива в атмосферу также в большом количестве выбрасываются оксид углерода, оксиды азота и несгоревшие твердые вещества в виде золы и сажи [1, 4, 20].

Организация мониторинга загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города Воронежа осуществляется Воронежским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Сеть работает в соответствии с требованиями РД 52.04.186-89 [6]. Осуществляются ежедневные измерения по 3-м срокам наблюдений: 7.00, 13.00, 19.00 за 12 месяцев по стационарным постам наблюдения (ПНЗ), в том числе: ПНЗ № 1

(г. Воронеж, ул. Ростовская, д. 44): по загрязняющим веществам: формальдегид, сажа, пыль, диоксид азота, диоксид серы; ПНЗ № 7 (г. Воронеж, ул. Лебедева, д. 2): по загрязняющим веществам: формальдегид, пыль, диоксид азота, диоксид серы; ПНЗ № 8 (г. Воронеж, ул. Ворошилова, д. 30): по загрязняющим веществам: формальдегид, пыль, диоксид азота, диоксид серы; ПНЗ № 9 (г. Воронеж, ул. Лидии Рябцевой, д. 51Б): по загрязняющим веществам: пыль, диоксид азота, диоксид серы; ПНЗ № 10 (г. Воронеж, ул. 9 Января, д. 49): по загрязняющим веществам: формальдегид, пыль, диоксид азота, диоксид серы.

Регистрируемые метеорологические показатели: температура воздуха (градусы), относительная влажность воздуха (%), скорость ветра (м/с). Концентрации загрязняющих веществ (мг/куб. м): формальдегид, сажа, пыль, диоксид азота, диоксид серы.

По данным мониторинга за состоянием атмосферного воздуха проводимого лабораторией Воронежского ЦГМС – филиала ФГБУ «Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» установлено, что «в воздухе города максимально-разовые концентрации достигали: по пыли – 1,6 ПДК; оксида углерода – 1,22 ПДК; диоксида азота – 1,11 ПДК, формальдегида – 1,30 ПДК, фенола – 1,30 ПДК. Наибольшее загрязнение атмосферного воздуха пылью, диоксидом азота, оксидом углерода, формальдегидом наблюдалось в юго-восточной части города на ПНЗ № 7 (ул. Лебедева, д. 2), где сосредоточены предприятия ТЭЦ –1, АО «Воронежсинтезкаучук», ЗАО «Воронежский шинный завод» и проходит автомагистраль с интенсивным движением автотранспорта. Установлено, что в летний период с 2015 по 2021 годы средняя концентрация по пыли составляла 0,99 ПДК с.с. и по формальдегиду – 1,09 ПДК с.с.; в зимний и осенний периоды по диоксиду азота – 1,65 ПДК с.с.» [18].

В работе представлены результаты анализа ежедневных наблюдений стационарных постов за содержанием загрязняющих веществ в атмосферном воздухе Воронежа за период с 1989 по 2021 годы. Объем выборки составил 11315 случаев [9-16, 18, 19].

Анализ связи между параметрами атмосферы и концентрациями загрязняющих веществ осуществлялся на основании парного и множественного коэффициентов корреляции.

С целью прогноза концентрации загрязняющих веществ в зависимости от распределения

метеорологических параметров был проведен регрессионный анализ. В качестве предикторов использованы среднемесячные значения концентраций пыли, формальдегида, двуоксида азота и диоксида серы, а в качестве предиктора использовались среднемесячные значения тех параметров атмосферы, при которых наблюдалась наиболее

тесная корреляционная связь ( $\geq 0,70$ ) и вычислены их регрессионные статистики.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Климатические характеристики Воронежа за период 1971-2000 годы по данным научно-прикладного справочника «Климат России» ВНИИГ-МИ-МЦД представлены в таблице 1.

Таблица 1

Климатические характеристики города Воронежа за период 1971-2000 годы  
[Table 1. Climatic characteristics of the city of Voronezh for the period 1971-2000]

Среднегодовые данные / Average annual data	Многолетние / Perennial
Температура, °C	6,3
Количество осадков, мм	571
Число дней с осадками	158
Скорость ветра, м/с	2,9
Повторяемость приземных инверсий температуры, %	26
Повторяемость штилей, %	13
Повторяемость ветров со скоростью 0–1 м/с, %	29
Повторяемость приподнятых инверсий температуры, %	56
Среднее многолетнее число дней с туманами, дни	30
Среднее многолетнее число дней с грозой, дни	29

Распределение средних за сезон значений многолетних параметров температуры, относительной

влажности воздуха и количества осадков в Воронеже, за период 1971-2000 годы, представлено на рисунке 1.

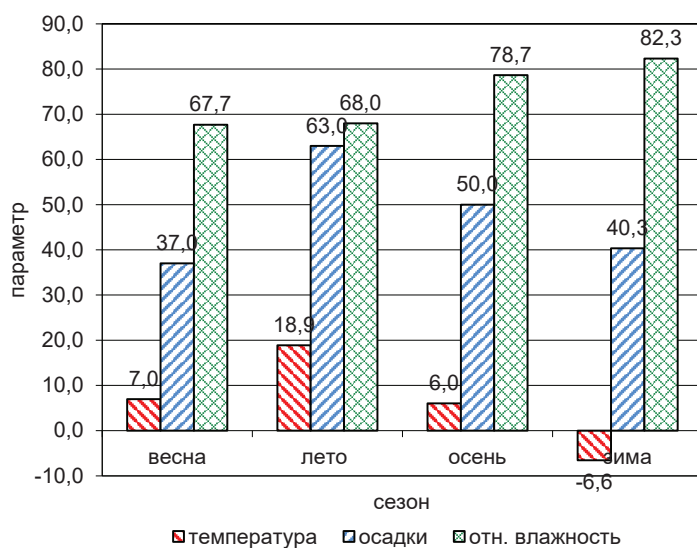


Рис. 1. Сезонное распределение метеорологических параметров атмосферы  
[Fig. 1. Seasonal distribution of atmospheric meteorological parameters]

Из рисунка 1 видно, что термический режим города Воронежа, за период 1971-2000 годов, имеет выраженный годовой ход с отрицательной сезонной температурой, зимой (-6.6 °C) и положительной, летом (18.9 °C).

Годовой ход осадков за период с 1971 по 2000 годы, представлен на рисунке 2.

Из анализа рисунка 2 видно, что самое большое количество осадков приходится на июль

(70 мм), а наименьшее – на февраль (33 мм) и март (31 мм), соответственно. Анализ среднего квадратичного отклонения количества осадков свидетельствует о том, что в период с июня по октябрь выпадение осадков подвержено большой неустойчивости. Наиболее устойчивый характер выпадения осадков наблюдается в холодное время года, с декабря (24 мм) по апрель (22 мм).

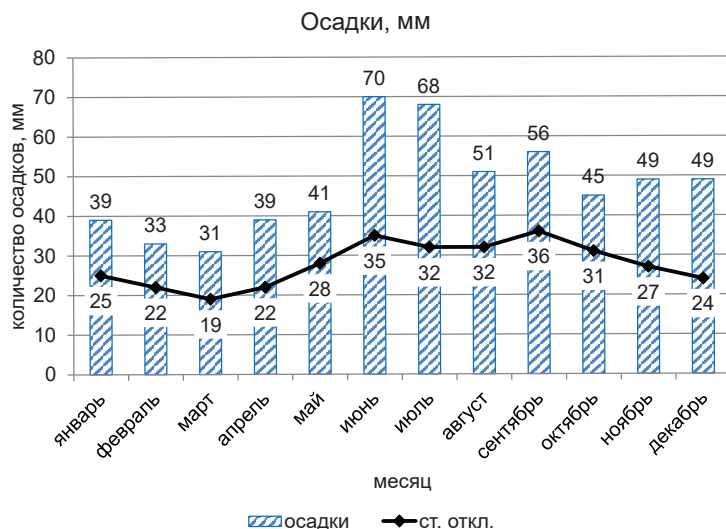


Рис. 2. Годовой ход количества осадков на станции Воронеж за период с 1971 по 2000 годы [Fig. 2. Annual variation of precipitation at Voronezh station from 1971 to 2000]

По сезонам наибольшее количество осадков также приходится на лето (среднее количество осадков за сезон – 63 мм), наименьшее – на весну (37 мм). Около половины годовой суммы осадков отмечено в вегетационный период, с нарастанием их от весны (апрель (39 мм)) к лету (июнь (70 мм) и июль (68 мм)), последующим падением к осени (октябрь 45 мм).

Одним из значимых показателей погодо-климатических факторов является относительная влажность воздуха. Из анализа рисунка

1 видно, что в теплый период (весна–лето) относительная влажность воздуха практически постоянна и находится на уровне 68 %. В холодный период года она повышается (осенью до 79 %, а зимой до 82 %).

Годовой ход относительной влажности воздуха представлен на рисунке 3.

Среднее многолетнее значение относительной влажности на территории города Воронежа составляет 74 % и имеет выраженный годовой ход. В теплый период года, с мая (59 %) по август (68 %),



Рис. 3. Годовой ход относительной влажности воздуха на станции Воронеж за период с 1949 по 2020 годы [Fig. 3. Annual variations of relative humidity at Voronezh station for the period from 1949 to 2020]

наблюдаются комфортные значения относительной влажности, а в холодный период года с ноября (85%) по март (78%) влажность повышена. Осенью относительная влажность воздуха выше, чем весной. Во временном внутригодовом ходе относительной влажности воздуха наблюдается тенденция её увеличения от минимальных значений в мае до максимальных значений в зимний

период. Минимальное среднее значение относительной влажности на метеостанции Воронеж за многолетний период наблюдений составило 16%, а абсолютный минимум за весь период наблюдений составил 10%.

Сезонное распределение метеорологических параметров атмосферы в различные сезоны года, представлено на рисунке 4.

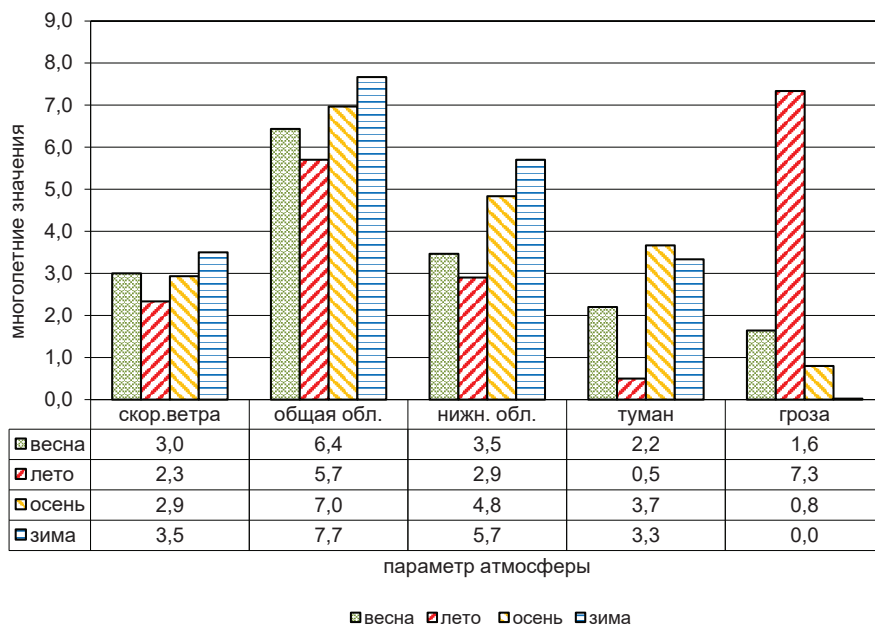


Рис. 4. Сезонное распределение метеорологических явлений погоды  
[Fig. 4. Seasonal distribution of meteorological weather phenomena]

Из анализа рисунка 4 видно, что летом средняя сезонная скорость ветра наименьшая и составляет 2,3 м/с, а осенью она увеличивается до 2,9 м/с. Весной средние сезонные значения скорости ветра составляют 3,0 м/с. Наиболее сильные скорости ветра наблюдаются зимой – 3,5 м/с. Такое распределение скорости ветра обусловлено изменением плотности воздуха, которая сильно

зависит от температуры: чем выше температура воздуха, тем ниже плотность воздуха.

Циркуляция атмосферы определяет ветровой режим исследуемой территории. Анализ повторяемости направления ветра метеостанции Воронеж (34123) в центральные месяцы холодного и теплого периодов представлен на рисунке 5.

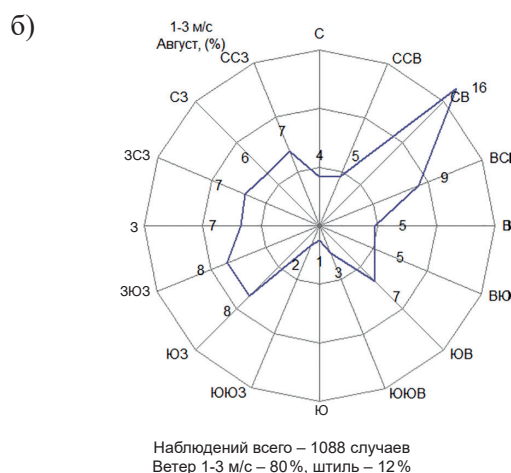
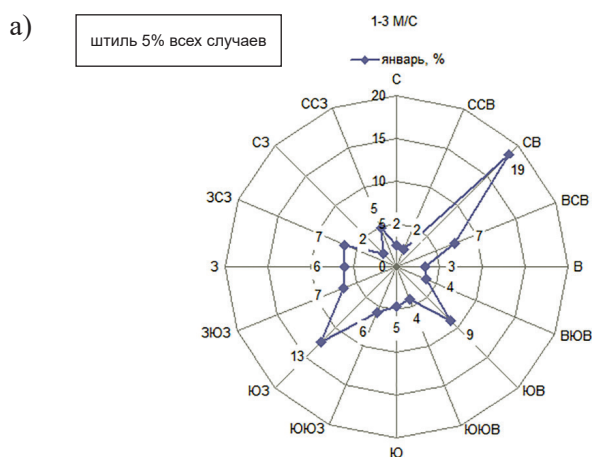


Рис. 5. Роза ветров станции Воронеж (34123)  
[Fig. 5. Voronezh station wind rose (34123)]

Из рисунка 5а видно, что зимой, при слабом ветре (1–3 м/сек) преобладающим направлением ветра является северо-восточное направление (19 %), юго-западное направление наблюдается в 13 % случаев, а юго-восточный ветер наблюдается только в 9 % случаев. Вероятность ветров других направлений не превышает 3–5 %. При этом повторяемость штилей составляет 5 %.

Летом (см. рис. 5б) с вероятностью 16 % сохраняется преобладающее северо-восточное направление слабых ветров (1–3 м/сек). Вероятность ветров западного сектора не превышает 8 %.

Характер распределения облачности (рис. 4) как общей, так и нижнего яруса (высотой менее 2,0 км) идентичен распределению средней сезонной скорости ветра, а именно: наблюдается

уменьшение количества баллов облачности от весны к лету: весна – общая облачность (6,4 балла) и облачность нижнего яруса (3,5 балла); летом – 5,7 и 2,9 балла соответственно. От осени к зиме, количество баллов облачности увеличивается: осень – общая облачность достигает 7,0 баллов и 4,8 балла – облачность нижнего яруса; зима – 7,7 и 5,7 баллов соответственно. Таким образом, зимой в Воронеже в основном наблюдается пасмурная погода, с резким уменьшением количества облаков с наступлением весны и преобладанием переменной облачности с небольшим количеством облаков нижнего яруса летом. Осенью количество облаков увеличивается.

Повторяемость различных видов облаков представлена в таблице 2 [1].

Таблица 2

Повторяемость различных видов облаков (станция Воронеж), %  
[Table 2. Frequency of different types of clouds (Voronezh station), %]

Вид облаков* / Types of clouds*	Январь / January	Февраль / February	Март / March	Апрель / April	Май / May	Июнь / June	Июль / July	Август / August	Сентябрь / September	Октябрь / September	Ноябрь / November	Декабрь / December	Год / Year
Ci	8	12	16	21	26	29	25	25	20	14	8	7	18
Cc	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2
Cs	0,2	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3
Ac	16	19	27	37	41	44	44	40	37	28	17	16	31
As	5	7	5	3	2	2	1	1	2	3	2	4	3
Cu	0,2	0,5	2	8	13	14	16	13	6	2	0,7	0,2	6
Cb	10	8	11	20	24	<b>30</b>	27	21	22	18	14	10	18
Sc	17	15	15	12	9	8	7	7	12	20	19	17	13
Ns	21	19	14	10	8	10	11	9	10	11	14	20	13
St	22	15	8	2	0,6	0,6	0,9	1	2	8	22	24	9
Frnб	16	14	8	3	0,2	0,4	0,2	0,4	1	4	10	15	6

\*) виды облаков: Ci – перистые; Cc – перисто-кучевые; Cs – перисто-слоистые; Ac – высоко-кучевые; As – высоко-слоистые; Cu – кучевые; Cb – кучево-дождевые; Sc – слоисто-кучевые; Ns – слоисто-дождевые; St – слоистые; Frnб – разорвано-дождевые.

[\*] types of clouds: Ci – cirrus; Cc – cirrocumulus; Cs – cirrostratus; Ac – altocumulus; As – altostratus; Cu – cumulus; Cb – cumulonimbus; Sc – stratocumulus; Ns – nimbostratus; St – stratus; Frnб – fractonimbus].

Из анализа таблицы 2 следует, что с апреля по сентябрь наибольшая повторяемость наблюдается у облаков верхнего (Ci: 25 – 29 %) и среднего (Ac: 37 – 44 %) ярусов, а также кучево-дождевых

облаков (Cb: до 30 %). В холодный период (с октября по апрель) наибольшая повторяемость наблюдается у облаков нижнего яруса (Sc: 17 – 20 %, St: 22 – 24 %).

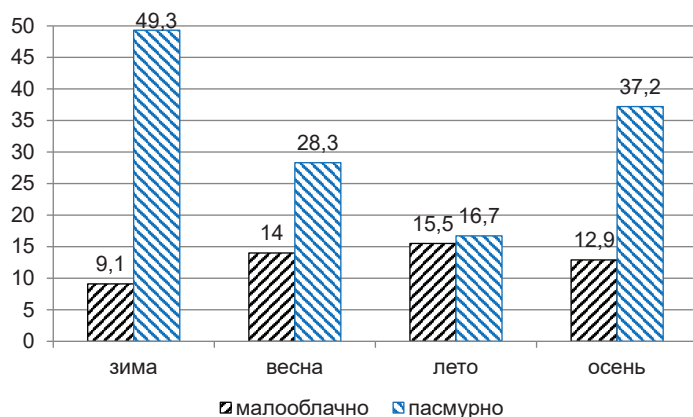
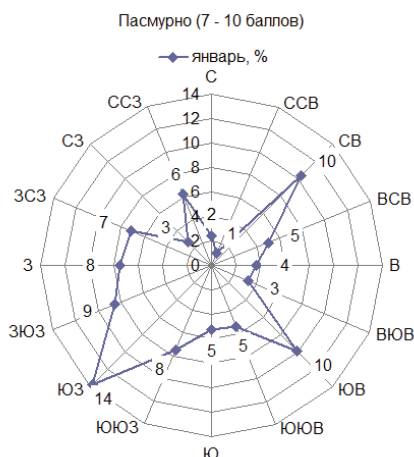


Рис. 6. Средняя многолетняя повторяемость ясных и пасмурных дней в различные сезоны года на станции Воронеж, %

[Fig. 6. Average long-term frequency of clear and cloudy days in different seasons at Voronezh station, %]

Сезонное распределение ясных и пасмурных дней представлено на рисунке 6, который наглядно показывает значительное увеличение пасмурной погоды в холодный период, особенно зимой, когда примерно каждый второй день – это пасмурная погода. Ясная погода наблюдается чаще весной (14,0 %) и летом (15,5 %).

а)



Представляет интерес анализ повторяемости состояния небосвода в различные сезоны года в зависимости от направления ветра. Результаты анализа для пасмурной погоды в холодный (январь) и теплый (июль) периоды года представлены на рисунке 7.

б)

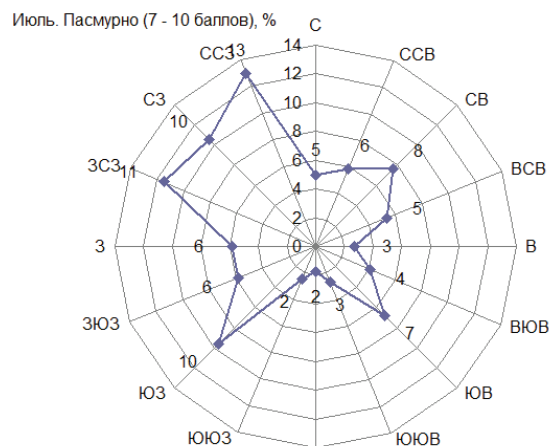


Рис. 7. Повторяемость пасмурной погоды в зависимости от направления ветра на станции Воронеж [Fig. 7. Frequency of cloudy weather depending on the wind direction at Voronezh station]

Наибольшая повторяемость пасмурной погоды (см. рис. 7а) в январе наблюдается при юго-западных ветрах (14 %), при юго-восточных и северо-восточных направлениях вероятность составляет 10 %. Вероятность пасмурной погоды западного сектора не превышает 8 %, а при северных ветрах (северный, северо-восточный) составляет 1–2 %.

Летом (см. рис. 7б) пасмурная погода в июле имеет наибольшую повторяемость при западно-северо-западных – северо-западных ветрах (10–13 %), что обусловлено влиянием циклонической деятельностью с Атлантики. Наименьшая вероятность

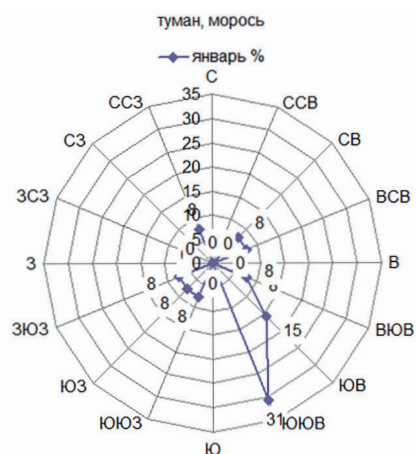
пасмурной погоды летом наблюдается при южном ветре и составляет 2–3 %.

Метеорологические явления, такие как туман и гроза, являются косвенной характеристикой устойчивости атмосферы и, как правило, характеризуют наличие/отсутствие задерживающих слоев в атмосфере, а также свидетельствуют о характере вертикальных движений воздуха.

Туман представляет собой результат конденсации водяного пара у земной поверхности (в приземном слое атмосферы). Туман часто образуется в областях повышенного давления с нисходящими

ми движениями воздуха и наличием в атмосфере инверсионных слоев. Влажность воздуха при тумане, как правило, близка 100 %. Наибольшая повторяемость туманов в Воронеже наблюдается осенью и составляет в среднем за каждый месяц сезона 3,7 дня, а для зимних месяцев – 3,3 дня. Весной, повторяемость туманов значительно меньше, чем осенью и зимой, и составляет 2,2 дня

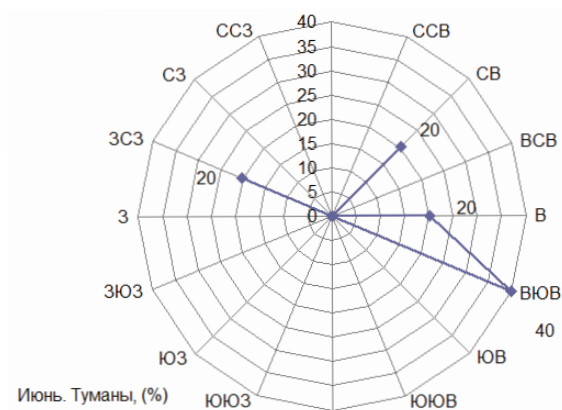
а) январь



в среднем за каждый месяц. Наименьшая вероятность образования тумана (0,5 дня) наблюдается в летние месяцы года. Общая продолжительность туманов в среднем за год колеблется от 145 до 280 часов [3].

Повторяемость туманов и мороси от направления ветра зимой (январь) и летом (июнь) представлена на рисунке 8.

б) июнь



Условные обозначения:

С; ССВ; ... – румбы

50; 17; ... – повторяемость тумана и мороси

Рис. 8. Преобладающее направление ветра при тумане и мороси в январе и июне (станция Воронеж)  
[Fig. 8. Prevailing wind direction during fog and drizzle in January and June (Voronezh station)]

Из рисунка 8 следует, что в холодное время года (см. рис. 8а) случаи с туманом и моросью обусловлены юго-юго-восточным направлением ветра (31 % случаев). Повторяемость других румбов ветра при тумане незначительная. Такая высокая повторяемость туманов в холодное время года обусловлена адвекцией теплого влажного воздуха, связанного с выходом Черноморских циклонов, способствующих образованию адвективных туманов. Летом (см. рис. 7 б), туманы с вероятностью 40 % наблюдаются при восточно-юго-восточных направлениях ветра и вероятностью 20 % при западно-северо-западных и восточных направлениях и связаны в первую очередь с установлением мощных стационарных антициклонов, в которых наблюдается образование радиационных туманов.

Гроза, в отличие от тумана, возникает при мощных вертикальных (конвективных) движениях воздуха, способствующих разрушению инверсий и поднятию загрязнений в высокие слои атмосферы. Гроза в основном наблюдается летом (7,3 дня в среднем за каждый месяц сезона). Вероятность грозы весной

составляет 1,6 дня, а осенью 0,8 дня. Зимой, вероятность грозы незначительна и близка к нулю [3].

Зависимость появления грозы от направления ветра представлена на рисунке 9.

Из анализа рисунка 9 следует, что грозы с вероятностью 13 % в июле наблюдаются при юго-восточных ветрах. При ветрах западного направления (З) вероятность их появления составляет 11 %, а при северо-восточных направлениях – 11 %. Появление гроз с вероятностью 7–9 % в Воронеже связано с адвекцией прохладного влажного воздуха с Атлантики (ЮЗ – 8 %, ЗЮЗ – 9 %), а также затоком холодного воздуха с севера на восточной периферии антициклона. При ветрах с юга (Ю) и севера (С), вероятность появления грозы составляет 1 – 3 %.

Распределение средних многолетних концентраций загрязнений воздуха Воронежа за период с 1989 по 2020 годы, в различные сезоны года, представлено на рисунке 10.

Анализ рисунка 10 позволяет сделать вывод, что уровень загрязнения воздуха высокий. Наибольший вклад в загрязнение окружающей сре-



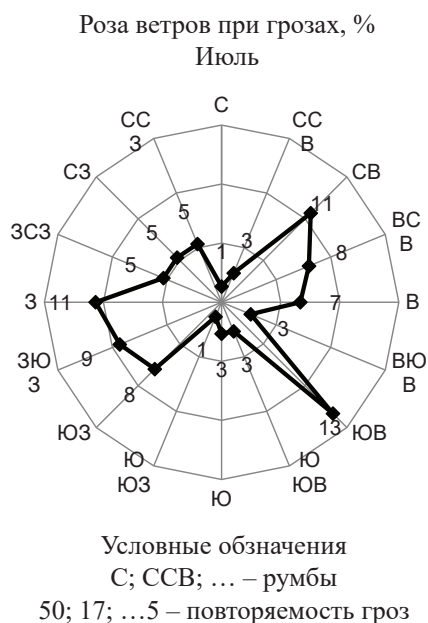


Рис. 9. Повторяемость грозы в июле при различных направлениях ветра на станции Воронеж (34123) за период 1949 по 2020 годы  
[Fig. 9. Frequency of thunderstorms in July with different wind directions at Voronezh station (34123) for the period 1949 to 2020]

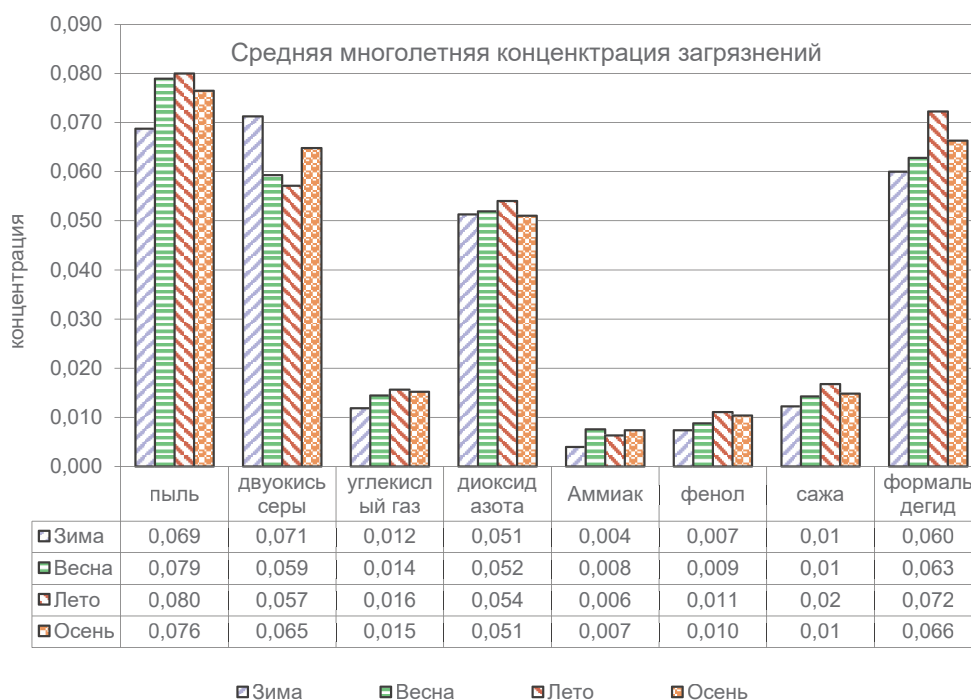


Рис. 10. Средние многолетние (с 1989 по 2020 годы) концентрации загрязнения воздуха в городе Воронеже в различные сезоны года  
[Fig. 10. Average long-term (from 1989 to 2020) concentrations of air pollution in Voronezh in different seasons of the year]

ды Воронежа за исследуемый период оказывали пыль, диоксид серы, формальдегид и двуокись азота. Средние многолетние концентрации сажи, окиси углерода, фенола и аммиака в различные сезоны года были незначительные.

Концентрации взвешенных веществ повышены вследствие влияния естественной пыли. По данным Роспотребнадзора по Воронежской области [9-17, 19] «максимальная разовая концентрация, достигает значений 5,3 ПДК». Наибольшая

повторяемость случаев превышения ПДК равна 21 %, причем, наблюдалась при штиле и ветрах восточного направления.

По данным [4] «двуокись серы в ранжированном ряду основных загрязнителей атмосферы находится на одном из первых мест. Это вредное вещество выделяется в окружающую среду главным образом при сжигании содержащих серу топлив: каменного угля, кокса, горючих сланцев, сернистой нефти. Токсическое действие двуокиси серы на человека весьма многообразно. В первую очередь оно связано с раздражением верхних дыхательных путей, что при длительном воздействии даже малых концентраций приводит к возникновению бронхитов и других заболеваний органов дыхания, к снижению иммунобиологической реактивности организма. Среднесуточное ПДК в воздухе составляет 0,05 мг/м<sup>3</sup>».

Из рисунка 10 видно, что во все сезоны года двуокись серы была выше установленной нормы с максимальными значениями зимой и уменьшением до минимальных значений концентрации летом. За исследуемый период ПДК максимально-разового воздействия (0,5 мг/м<sup>3</sup>) была превышена в 1,5-2 раза.

Диоксид азота представляет собой один из основных загрязнителей атмосферного воздуха, образующийся в процессе горения при высоких температурах. Средние концентрации диоксида азота, как видно из рисунка 10, во все сезоны года превышают установленные значения ПДК с.с.=0,004 мкг/м<sup>3</sup> (1 ПДК) и практически выше 1,3 ПДК. Наибольшая средняя концентрация отмечается на станции 7 вблизи автотранспортной

магистрали (3,2 ПДК). Максимальная разовая концентрация достигает 2,4 ПДК.

Воздух загрязнен канцерогенноопасным веществом – формальдегидом. По данным [6, 9 - 19] «средняя за год концентрация формальдегида в городе Воронеже составляет от 2,0 до 2,7 ПДК, максимальная разовая – выше 2,5 ПДК».

По данным Роспотребнадзора по Воронежской области [9 - 17, 19] «средняя за год концентрация оксида углерода на всех станциях ниже 1 ПДК, максимальная разовая составляет 2,6 ПДК».

По информации ГУ «Воронежский ЦГМС» индекс суммарного загрязнения воздуха Воронежа, рассчитанный по 17 ингредиентам колеблется в пределах от 7,5 до 11,5. Увеличение концентраций загрязняющих веществ наблюдалось по пыли, окиси азота, формальдегида в районе промышленного узла ТЭЦ-1, ОАО «Воронежсинтезкаучук» (ПНЗ N7, ул. Лебедева, д. 2). В результате анализа проб атмосферного воздуха, отобранных на стационарных постах наблюдения и пяти маршрутных точках, превышения максимально-разовых концентраций в воздухе города достигали по пыли – 4,4 ПДК, по оксиду углерода – 2,8 ПДК, по диоксиду азота – 1,3 ПДК, по формальдегиду – 1,2 ПДК. Наибольшее увеличение средних концентраций загрязняющих веществ, в приземном слое атмосферы, наблюдалось в теплый период года [2]. Осредненная картина распределения валового выброса загрязняющих веществ от стационарных источников по территории города за период 1989 - 2020 годов представлена на рисунке 11.

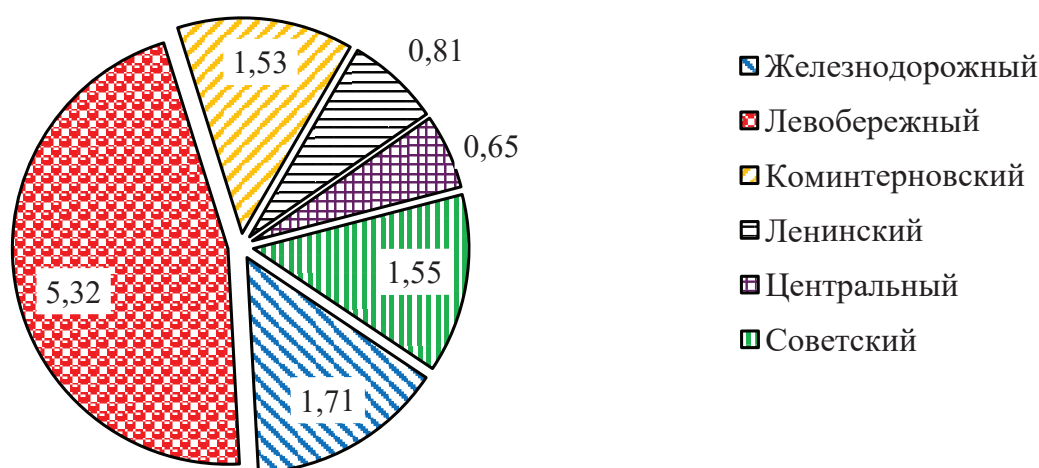


Рис. 11. Валовой выброс загрязняющих веществ от стационарных источников по различным районам Воронежа за период 1989–2020 годов, (т/г)  
 [Fig. 11. Gross emission of pollutants from stationary sources in various districts of Voronezh for the period 1989-2020], (t/g)

Из рисунка 11 видно, что наибольший выброс загрязнений наблюдается в Левобережном районе города Воронежа, а наименьший – в Центральном.

С целью оценки влияния метеорологических параметров на уровень загрязнения воздуха проведен корреляционный анализ между концентра-

циями антропогенных примесей за период с 1986 по 2020 годы и различными метеорологическими параметрами за аналогичный период.

Результаты корреляционного анализа концентрации пыли с метеорологическими параметрами представлены на рисунке 12.

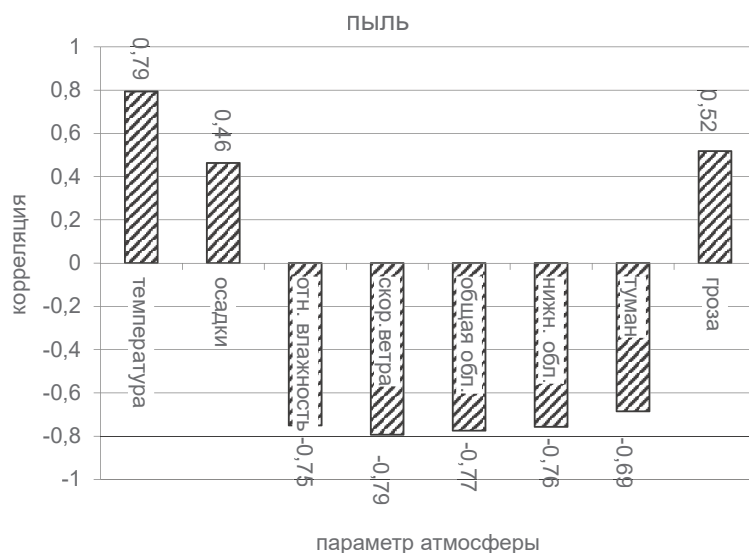


Рис. 12. Распределение корреляционных связей концентрации пыли с метеорологическими параметрами (числа – коэффициенты корреляции, r)

[Fig. 12. Distribution of correlations between dust concentration and meteorological parameters] (numbers are correlation coefficients, r)

Из рисунка 12 видно, что наиболее тесная связь между концентрацией пыли и метеорологическими параметрами наблюдается с температурой ( $r = 0,79$ ), относительной влажностью воздуха ( $r = -0,75$ ), скоростью ветра ( $r = -0,75$ ), облачностью ( $r = -0,77$  и  $r = -0,76$ ), а также туманом ( $r = -0,69$ ). Следует отметить, что знак корреляционных связей, между концентрацией пыли и исследуемыми параметрами отрицательный, за исключением температуры, у которой знак связи положительный. Повышение температуры способствует увеличению конвективных (вертикальных) движений воздуха, а, следовательно, и подъему пыли с поверхности земли и увеличению ее концентрации. Увеличение облачности препятствует поступлению прямой солнечной радиации к поверхности почвы и ее прогреву, соответственно, в пасмурную погоду содержание пыли в воздухе меньше, чем в ясную погоду. Влажный воздух способствует оседанию пыли в приземном слое атмосферы: чем больше относительная влажность воздуха, тем меньше концентрация пыли.

Анализ корреляционных связей между загрязняющими веществами в атмосферном воздухе и явлениями погоды – туманом и грозой – проводился в

дни, когда отмечались эти явления. Число случаев с туманами составило 424 дня, а с грозой – 391.

Меньшая величина корреляционной связи между концентрацией пыли и количеством дней с туманом, а также отрицательный знак корреляции ( $r = -0,69$ ) по сравнению с предыдущими параметрами свидетельствует об интегральном влиянии различных метеорологических параметров, наблюдаемых при тумане, на концентрацию пыли. Слой тумана надо рассматривать как слой облаков с большой влажностью воздуха у поверхности земли, препятствующих ее прогреву и способствующий уменьшению концентрации пыли у поверхности земли. В то же время слабый ветер ( $0 - 3$  м/с), наблюдаемый при тумане, увеличивает концентрацию пыли в приземном слое атмосферы. В результате анализа комплексного взаимодействия между собой различных метеорологических параметров в тумане отмечено понижение концентрации пыли у земной поверхности.

Особый интерес представляет анализ положительной связи концентрации пыли с такими явлениями погоды, как гроза и осадки. На первый взгляд, выпадение осадков и наличие грозы, свидетельствующие о наличии кучево-дождевой

облачности с ливневыми осадками, должны способствовать уменьшению концентрации пыли у поверхности земли и определять отрицательный знак корреляционной связи. Положительный знак и умеренная величина корреляционной связи с осадками ( $r = 0,46$ ) и грозой ( $r = 0,52$ ), свидетельствуют о доминирующей роли восходящих движений воздуха и способствующих значительному увеличению концентрации пыли, перед началом рассматриваемых явлений погоды. Нисходящие движения воздуха, которые наблюдаются во вре-

мя рассматриваемых явлений погоды, уменьшают величину корреляционной связи.

Данное положение свидетельствует о необходимости совершенствования методики наблюдения за концентрацией пыли в приземном слое воздуха. Необходимо проводить анализ концентрации пыли до начала, во время и после прохождения указанных явлений погоды.

Анализ корреляционной связи между концентрацией диоксида серы и метеорологическими параметрами представлен на рисунке 13.

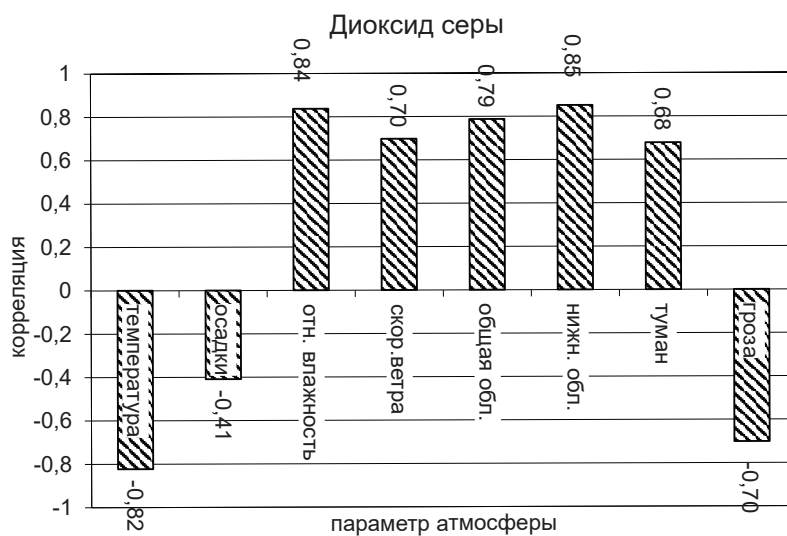


Рис. 13. Распределение корреляционных связей концентрации диоксида серы с метеорологическими параметрами (числа – коэффициенты корреляции,  $r$ )  
[Fig. 13. Distribution of correlations between sulfur dioxide concentration and meteorological parameters] (numbers are correlation coefficients,  $r$ )

Воздействие диоксида серы в концентрациях выше предельно допустимых может приводить к существенному увеличению различных болезней дыхательных путей, воздействовать на слизистые оболочки, вызывать воспаление носоглотки, бронхиты, кашель, хрипоту и боль в горле. Особенно высокая чувствительность к диоксиду серы наблюдается у людей с хроническими нарушениями органов дыхания, с астмой.

Из рисунка 13 видно, что характер распределения корреляционных связей между диоксидом серы и метеорологическими параметрами обратно пропорционален пыли. Наиболее высокие концентрации диоксида серы наблюдаются при низких температурах окружающего воздуха ( $r = -0,82$ ), а также при отсутствии восходящих вертикальных движений воздуха, которые наблюдаются при грозе ( $r = -0,70$ ) и осадках ( $r = -0,41$ ). Увеличению концентрации диоксида серы также

способствует наличие облачности ( $r = 0,79$ ), особенно облаков нижнего яруса ( $r = 0,85$ ), высокая относительная влажность воздуха ( $r = 0,84$ ) и наличие тумана ( $r = 0,68$ ).

Перечисленные параметры атмосферы свидетельствуют о сильной зависимости концентрации диоксида серы от состояния атмосферы, от ее устойчивости, от интенсивности и направленности вертикальных движений воздуха.

Количественные характеристики связи концентрации формальдегида и диоксида азота с метеорологическими параметрами представлены на рисунках 14, 15.

Характер связи концентраций формальдегида и двуокиси азота с метеорологическими параметрами аналогичен распределению корреляционных связей концентрации пыли. Увеличение концентрации формальдегида наблюдается в малооблачные дни ( $r = -0,82$  – общая облачность и

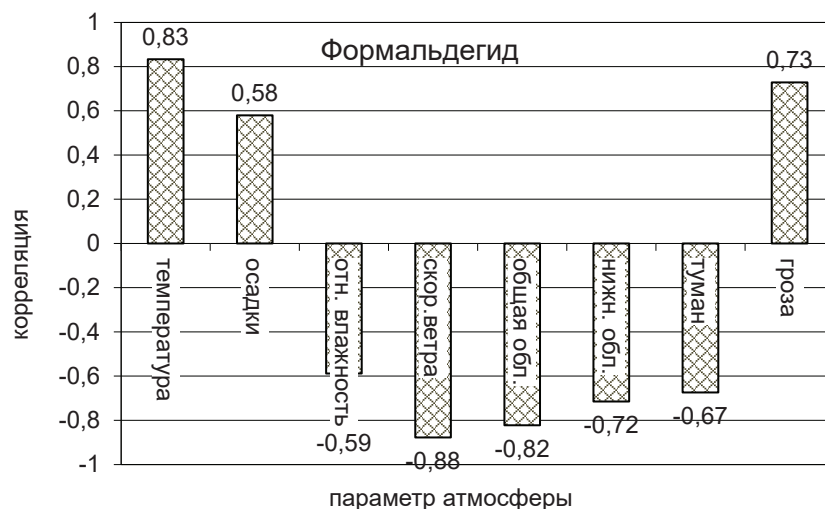


Рис. 14. Количественная характеристика связи концентрации формальдегида с метеорологическими параметрами (числа – коэффициенты корреляции, r)  
 [Fig. 14. Quantitative characteristics of the relationship between formaldehyde concentration and meteorological parameters] (numbers are correlation coefficients, r)



Рис. 15. Количественная характеристика связи концентрации диоксида азота с метеорологическими параметрами (числа – коэффициенты корреляции, r)  
 [Fig. 15. Quantitative characteristics of the relationship between the concentration of nitrogen dioxide and meteorological parameters] (numbers are correlation coefficients, r)

$r = -0,72$  – облака нижнего яруса), дни с высокой температурой ( $r = 0,83$ ), при слабом ветре ( $r = -0,88$ ), отсутствии тумана ( $r = -0,67$ ) и наличии мощных восходящих движений воздуха, которые наблюдаются при грозе ( $r = 0,73$ ).

Из анализа рисунка 15 видно, что концентрация диоксида азота в меньшей степени, чем у рассматриваемых ранее загрязняющих веществ, зависит от распределения метеорологических параметров. Оценка силы связи по величине коэффициента корреляции между метеорологическими параметрами и диоксидом азота ниже

рассматриваемых ранее загрязняющих веществ и составляет  $r = 0,5 - 0,68$ . Условия, способствующие увеличению концентрации диоксида азота, аналогичны с условиями погоды, благоприятными для увеличения концентрации пыли и формальдегида.

Проведенный корреляционный анализ позволил выявить наличие связи между параметрами атмосферы, характеризующими погоду, и концентрацией загрязняющих веществ. С целью разработки прогностических правил между предиктантами, в качестве которых выбирается прогно-

зируемая величина концентрации загрязняющего вещества, и предикторами – параметрами погоды,

проведен регрессионный анализ. Результаты анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3

Показатели уравнений множественной регрессии  
[Table 3. Indicators of multiple regression equations]

Коэффициенты / Odds	Предикторы / Predictors	Предиктанты / Predictants			
		Пыль / Dust	Диоксид серы / sulphur dioxide	Формальдегид / Formaldehyde	Диоксид азота / nitrogen dioxide
Свободный член a / free member a		0,15569	0,18691	0,108803	0,11483
X1	температура / temperature	-0,00079	-0,00158	0,000391	-7,1E-06
X2	влажность / humidity	-0,00084	-0,00076	0,000125	-0,00024
X3	скорость ветра / wind speed	-0,03811	-0,03244	0,007075	0,00717
X4	Общая Облачность / General cloudiness	0,017257	0,001139	-0,01535	-0,01454
X5	Нижняя Облачность / lower clouds	-0,0038	0,007157	0,006317	0,00732

Для каждого из исследуемых поллютантов (предиктанты / predictants), представленных в таблице 3, были получены элементы эмпирических уравнений: свободные члены уравнения и параметры регрессии

(коэффициенты эмпирической модели) для метеорологических элементов (предикторы / predictors). Для оценки полученных уравнений регрессии, в таблице 4, приведены регрессионные статистики.

Таблица 4

Регрессионные статистики уравнений регрессии  
[Table 4. Regression statistics of regression equations]

Коэффициенты / Odds	Пыль / Dust	Диоксид серы / sulphur dioxide	Формальдегид / Formaldehyde	Диоксид азота / nitrogen dioxide
Множественный R	0,87	0,98	0,91	0,91
Коэффициент (индекс) множественной детерминации R <sup>2</sup>	0,75	0,96	0,82	0,83
Стандартная ошибка	0,0052	0,0017	0,0034	0,0012

Согласно [21] «естественной мерой тесноты этой связи служит отношение дисперсии призна-

ка Y, объясненной регрессионной моделью, к общей дисперсии признака Y»:

$$R_{Y|X_1, \dots, X_m}^2 = \frac{\text{объясненная дисперсия}}{\text{полная дисперсия } Y} = 1 - \frac{\text{остаточная дисперсия}}{\text{полная дисперсия } Y}$$

Величина R называется коэффициентом множественной корреляции и определяет степень тесноты связи результирующего признака Y со всем набором факторных признаков X<sub>1</sub>, ..., X<sub>p</sub>. Согласно [21], чем ближе коэффициент множественной детерминации R<sup>2</sup> к единице и чем меньше величина стандартной ошибки, тем точнее уравнение регрессии (1) описывает эмпирические данные,

т.е. вариация зависимой переменной почти полностью определяется изменениями объясняющих переменных.

Анализируя таблицу 4, можно сделать выводы о том, что во всех исследуемых случаях значения параметра R<sup>2</sup> имеют высокие значения от 0,75 для пыли, до 0,96 для диоксида серы, что свидетельствует о высоком уровне аппроксимации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ влияния метеорологических параметров на концентрацию загрязняющих веществ позволяет сделать следующие выводы: 1) выявлена тесная связь между метеорологическими параметрами и концентрациями загрязняющих веществ; 2) влияние метеорологических параметров на концентрацию различных загрязняющих веществ не одинаково и носит порой противоположный характер, т.е. увеличение значений метеорологических параметров для одних загрязняющих веществ увеличивает концентрацию, а для других наоборот – уменьшает; 3) к разработке комплексных (интегрированных) показателей самоочищения атмосферы необходимо подходить дифференцировано, а именно: необходимо учитывать физические и химические свойства загрязняющих веществ и их взаимодействие с метеорологическими параметрами; использование одного комплексного показателя самоочищения атмосферы для всех загрязняющих веществ некорректно; 4) анализ влияния метеорологических явлений погоды, таких как осадки, туман, гроза на концентрацию загрязняющих веществ, требует дополнительного всестороннего изучения с точки зрения разработки методики исследований. Необходимо оценивать синоптическую ситуацию и учитывать различные механизмы образования указанных выше явлений погоды, а именно: разделять на туманы радиационные, адвективные и туманы восхождения; грозы фронтальные и внутримассовые; осадки, образуемые и выпадающие на теплом и холодном фронтах; 5) требуется разбиение временного интервала изменений концентрации загрязняющих веществ в зависимости от явлений погоды на различные отрезки: до начала, во время начала, во время наблюдения явления погоды и после его окончания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов Л. М., Виноградов П. М., Акимов Е. Л. Комплексная оценка экологической обстановки с учетом состояния атмосферы и функционально-планировочной структуры города // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2014, № 4, с. 57-67.
2. Акимов Л. М., Акимов Е. Л. Пространственное распределение метеорологических параметров, влияющих на жизнедеятельность человека на территории Центрального Черноземья // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2014, № 2, с. 17-23.
3. Алтынбаев Р. Б., Гафуров А. С., Шайхутдинова А. А. Автоматизация системы экологического мони-

торинга промышленных городских комплексов с применением спутниковых технологий GPS/ГЛОНАСС // *Экология и промышленность России*, 2014, № 12, с. 17-19

4. Аналитический обзор: Качество воздуха в крупнейших городах России за десять лет 1998–2007 гг. / Э. Ю. Безуглая, Е. К. Завадская, Т. П. Ивлева и др. Санкт-Петербург: ГУ «ГГО», Росгидромет, 2009. 133 с.
5. Безуглая Э. Ю. Проблемы загрязнения воздуха // *Крупнейшие города России. «Инженерные системы» АВОК-Северо-Запад*, 2002, № 2 (6), с. 19-21.
6. Безуглая Э. Ю. *Воздух городов и его изменения*. Санкт-Петербург: Астерион, 2008. 254 с.
7. *Воронежский ЦГМС*. – URL: <http://www.cgms.ru> (дата обращения: 21.05.2022). – Текст: электронный.
8. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» / Утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021, № 2. – 469 с.
9. *Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации (России) за 1998 год*. Санкт-Петербург: НИИ охраны атмосферного воздуха, 1999. 482 с.
10. *Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации (России) за 1999 год*. Санкт-Петербург: НИИ охраны атмосферного воздуха, 2000. 433 с.
11. *Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации (России) за 2000 год*. Санкт-Петербург: НИИ охраны атмосферного воздуха, 2001. 404 с.
12. *Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации (России) за 2001 год*. Санкт-Петербург: НИИ охраны атмосферного воздуха, 2002. 296 с.
13. *Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации (России) за 2002, 2003 гг.* Санкт-Петербург: НИИ охраны атмосферного воздуха, 2004. 281 с.
14. *Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации (России) за 2004 год*. Санкт-Петербург: НИИ охраны атмосферного воздуха, 2005. 272 с.
15. *Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации (России)*. Санкт-Петербург: НИИ охраны атмосферного воздуха, 2006. 283 с.
16. *Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и регионов Российской Федерации (России) 2006-2008 гг.* Санкт-Петербург: НИИ охраны атмосферного воздуха, 2007. 319 с.; 2008. 202 с.; 2009. 208 с.
17. *Ежегодник Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 1998-2020 гг.* Санкт-Петербург: ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2000. 239 с.; 2001. 182 с.; 2002. 212 с.; 2003. 222 с.; 2004. 218 с.; 2006. 216 с.; 2008. 211 с.; 2009. 222 с.; 2010. 215 с.; 2011. 224 с.; 2012. 216 с.; 2013. 198 с.; 2014. 206 с.; 2015.

222 с.; 2016. 202 с.; 2017. 196 с.; 2018. 216 с.; 2019. 206 с.; 2020. 212 с.

18. *О состоянии окружающей среды и природоохранной деятельности городского округа город Воронеж в 2009 г.: доклад* / Управление по охране окружающей среды администрации городского округа город Воронеж. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2010. 78 с.

19. *РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы*. Москва: Гидрометеониздат, 1991. 694 с.

20. *Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Главная геофизиче-*

*ская обсерватория им. А. И. Воейкова*. Санкт-Петербург, 1999. 130 с.

21. Фёрстер Э., Рёнц Б. *Методы корреляционного и регрессионного анализа*. 20. *Руководство для экономистов*. Москва: Финансы и статистика, 1983. 304 с.

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

Поступила в редакцию 27.05.2022

Принята к публикации 30.11.2022

---

---

## GEOGRAPHY

---

---

UDC 504 (06)

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/4/19-36>

### Mathematical Description and Calculation of the Influence of Weather Conditions on the Concentration of Pollutants and Carcinogens in the Atmosphere

L. M. Akimov✉, E. L. Akimov, A. A. Part

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

**Abstract:** The purpose is to develop a diagnostic model for predicting the concentration of major air pollutants based on the analysis of relationships between the concentration of pollutants and atmospheric parameters of the city of Voronezh.

**Materials and methods.** For the mathematical interpretation of the processes under study, statistical methods of relationship analysis research, regression method were used, which allowed the most accurate reflection of the essence of pollution processes on the background of changes in atmospheric conditions. Numerical data processing was carried out using MSExcel software. As input data we used climatic parameters for the period 1971-2000 according to the scientific reference book "Climate of Russia" as well as daily data on atmospheric air pollution in the city of Voronezh and data on the average daily condition of the atmosphere of the Voronezh Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring for the period from 1989 to 2020; the total sample size exceeded 11000 cases.

**Results and discussion.** The main regularities in the distribution of meteorological parameters of the atmosphere of Voronezh in different seasons of the year have been revealed. The climatic parameters of the main indicators of atmospheric conditions for the period 1971-2000 have been found. The temporal distribution of concentrations of various pollutants in different seasons of the year was analysed and the magnitude of their correlation with meteorological parameters was determined. It has been found that the close relationship between meteorological parameters and various pollutants is different. The influence of meteorological parameters on the concentration of different pollutants is sometimes opposite, i.e. increasing the values of meteorological parameters for some pollutants increases the concentration and for others the opposite reduces it.

**Conclusion.** The work has solved an urgent practice-oriented geo-ecological problem – the diagnostic model for predicting the concentration of major pollutants from atmospheric parameters has been developed. Their regression dependences are revealed, and their reliability is assessed.

---

© Akimov L. M., Akimov E. L., Part A. A., 2022

✉ Leonid M. Akimov, e-mail: [akl63@bk.ru](mailto:akl63@bk.ru)



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



**Key words:** concentration, pollutants, wind, temperature, precipitation, humidity, correlation, regression.

**Funding:** The research was supported by the Russian Science Foundation, project no. 20-17-00172.

**For citation:** Akimov L. M., Akimov E. L., Part A. A. Mathematical Description and Calculation of the Influence of Weather Conditions on the Concentration of Pollutants and Carcinogens in the Atmosphere. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2022, no. 4, pp. 19-36 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/4/19-36>

#### REFERENCES

1. Akimov L. M., Vinogradov P. M., Akimov E. L. Kompleksnaya otsenka ekologicheskoy obstanovki s uchetom sostoyaniya atmosfery i funktsional'no-planirovochnoy struktury goroda [Comprehensive assessment of the environmental situation taking into account the state of the atmosphere and the functional and planning structure of the city]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2014, no. 4, pp. 57-67. (In Russ.)
2. Akimov L. M., Akimov E. L. Prostranstvennoe raspredelenie meteorologicheskikh parametrov, vliyayushchikh na zhiznedeyatel'nost' cheloveka na territorii Tsentral'nogo Chernozem'ya [Spatial distribution of meteorological parameters affecting human activity on the territory of the Central Chernozem region]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2014, no. 2, pp. 17-23. (In Russ.)
3. Altynbaev R. B., Gafurov A. S., Shaykhutdinova A. A. Avtomatizatsiya sistemy ekologicheskogo monitoringa promyshlennykh gorodskikh kompleksov s primeneniem sputnikovykh tekhnologiy GPS/GLONASS [Automation of the environmental monitoring system of industrial urban complexes using GPS/GLONASS satellite technologies]. *Ekologiya i pro-myshlennost' Rossii*, 2014, no. 12, pp. 17-19. (In Russ.)
4. *Analiticheskiy obzor: Kachestvo vozdukh v krupneyshikh gorodakh Rossii za desyat' let 1998–2007 gg.* [Air quality in the largest cities of Russia for ten years 1998-2007: Analytical review] / E. Yu. Bezuglaya, E. K. Zavadsкая, T. P. Ivleva i dr. Saint-Petersburg: GU «GGO», Rosgidromet, 2009. 133 p. (In Russ.)
5. Bezuglaya E. Yu. Problemy zagryazneniya vozdukh [Problems of air pollution]. *Krupneyshie goroda Rossii. «Inzhenernyye sistemy» AVOK-Severo-Zapad*, 2002, no. 2 (6), pp. 19-21. (In Russ.)
6. Bezuglaya E. Yu. *Vozdukh gorodov i ego izmeneniya* [Urban air and its changes]. Saint-Petersburg: Asterion, 2008. 254 p. (In Russ.)
7. *Voronezh CGMS*. – URL: <http://www.cgms.ru> (accessed 21.05.2022). – Text: electronic. (In Russ.)
8. SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya» [Utv. Postanovleniyem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021, № 2. – 469 s.
9. *Ezhegodnik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu gorodov i regionov Rossiyskoy Federatsii (Rossii) za 1998 god* [Yearbook of emissions of pollutants into the atmosphere of cities and regions of the Russian Federation (Russia) for 1998]. Saint-Petersburg: NII okhrany atmosfernogo vozdukh, 1999. 482 p. (In Russ.)
10. *Ezhegodnik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu gorodov i regionov Rossiyskoy Federatsii (Rossii) za 1999 god* [Yearbook of emissions of pollutants into the atmosphere of cities and regions of the Russian Federation (Russia) for 1999]. Saint-Petersburg: NII okhrany atmosfernogo vozdukh, 2000. 433 p. (In Russ.)
11. *Ezhegodnik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu gorodov i regionov Rossiyskoy Federatsii (Rossii) za 2000 god* [Yearbook of emissions of pollutants into the atmosphere of cities and regions of the Russian Federation (Russia) for 2000]. Saint-Petersburg: NII okhrany atmosfernogo vozdukh, 2001. 404 p. (In Russ.)
12. *Ezhegodnik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu gorodov i regionov Rossiyskoy Federatsii (Rossii) za 2001 god* [Yearbook of emissions of pollutants into the atmosphere of cities and regions of the Russian Federation (Russia) for 2001]. Saint-Petersburg: NII okhrany atmosfernogo vozdukh, 2002. 296 p. (In Russ.)
13. *Ezhegodnik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu gorodov i regionov Rossiyskoy Federatsii (Rossii) za 2002, 2003 gg.* [Yearbook of emissions of pollutants into the atmosphere of cities and regions of the Russian Federation (Russia) for 2002, 2003]. Saint-Petersburg: NII okhrany atmosfernogo vozdukh, 2004. 281 p. (In Russ.)
14. *Ezhegodnik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu gorodov i regionov Rossiyskoy Federatsii (Rossii) za 2004 god* [Yearbook of emissions of pollutants into the atmosphere of cities and regions of the Russian Federation (Russia) for 2004]. Saint-Petersburg: NII okhrany atmosfernogo vozdukh, 2005. 272 p. (In Russ.)
15. *Ezhegodnik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu gorodov i regionov Rossiyskoy Federatsii (Rossii)* [Yearbook of emissions of pollutants into the atmosphere of cities and regions of the Russian Federation (Russia)]. Saint-Petersburg: NII okhrany atmosfernogo vozdukh, 2006. 283 p. (In Russ.)
16. *Ezhegodnik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu gorodov i regionov Rossiyskoy Federatsii (Rossii) 2006–2008 gg* [Yearbook of emissions of pollutants into the atmosphere of cities and regions of the Russian Federation (Russia) 2006-2008]. Saint-Petersburg: NII okhrany atmosfernogo vozdukh, 2007. 319 p.; 2008. 202 p.; 2009. 208 p. (In Russ.)
17. *Ezhegodnik Sostoyanie zagryazneniya atmosfery v gorodakh na ter-ritorii Rossii za 1998–2020 gg* [Yearbook The state of atmospheric pollution in cities in Russia for 1998-2020]. Saint-Petersburg: FGBU «GGO» Rosgi-

drometa, 2000. 239 p.; 2001. 182 p.; 2002. 212 p.; 2003. 222 p.; 2004. 218 p.; 2006. 216 p.; 2008. 211 p.; 2009. 222 p.; 2010. 215 p.; 2011. 224 p.; 2012. 216 p.; 2013. 198 p.; 2014. 206 p.; 2015. 222 p.; 2016. 202 p.; 2017. 196 p.; 2018. 216 p.; 2019. 206 p.; 2020. 212 p. (In Russ.)

18. *O sostoyanii okruzhayushchey sredy i prirodookhrannoy deyatel'nosti gorodskogo okruga gorod Voronezh v 2009 g.: doklad* [On the state of the environment and environmental protection activities of the Voronezh City District in 2009: report] / Upravlenie po okhrane okruzhayushchey sredy administratsii gorodskogo okruga gorod Voronezh. Voronezh: Izdatel'sko-poligraficheskiy tsentr Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2010. 78 p. (In Russ.)

19. *RD 52.04.186-89 Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery* [RD 52.04.186-89 Guidelines for air pollution control]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1991. 694 p. (In Russ.)

Акимов Леонид Мусамудинович

кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма 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 факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4909-4290, e-mail: akimovvsu@gmail.com

Парт Анна Александровна

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-3356-0675, e-mail: anna\_razinkova@mail.ru

20. *Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okru-zhayushchey sredy. Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A.I. Voeykova* [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. The Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeykov]. Saint-Petersburg, 1999. 130 p. (In Russ.)

21. Ferster E., Rents B. *Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza. 20. Rukovodstvo dlya ekonomistov* [Methods of correlation and regression analysis. 20. A Guide for economists]. Moscow: Finansy i statistika, 1983. 304 p. (In Russ.)

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

Received: 27.05.2022

Accepted: 30.11.2022

Leonid M. Akimov

Cand. Sci. (Geogr), Associate Professor, Head of the Department of Nature Management, Faculty of Geography, Goecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0749-1976, e-mail: akl63@bk.ru

Evgeniy L. Akimov

Cand. Sci. (Geogr), Associate Professor at the Department of Nature Management, Faculty of Geography, Goecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4909-4290, e-mail: akimovvsu@gmail.com

Anna A. Part

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor at the Department of Nature Management, Faculty of Geography, Goecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3356-0675, e-mail: anna\_razinkova@mail.ru