

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

М. В. Захарова

*Калужский колледж народного хозяйства и природообустройства, Россия*

*Поступила в редакцию 27 декабря 2018 года*

**Аннотация:** Для оценки погрешности данных наблюдений за состоянием загрязнения атмосферного воздуха города Калуги в статье выполнен статистический анализ временных рядов концентраций примесей. Результаты статистической обработки исходной информации позволили установить средние квадратические ошибки наблюдений, их относительные и средние абсолютные ошибки, сделать вывод о достоверности исходных данных.

**Ключевые слова:** атмосферный воздух, примеси, временные ряды, статистический анализ, однородность, погрешность.

### Estimation of the error of observations of the state of air pollution

M. V. Zakharova

**Abstract:** Statistical analysis of the time series of impurity concentrations to estimate the error of observations of the level of air pollution in the city of Kaluga was done. The results of statistical processing of initial information allowed to establish the standard errors of the observations, their relative and average absolute errors, to make a conclusion about the reliability of initial data.

**Key words:** atmospheric air, impurities, time series, static analysis, homogeneity, error.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной информацией, дающей представление о качестве атмосферного воздуха городов Российской Федерации, служат данные первичных наблюдений на сети постов мониторинга за загрязнением атмосферы, входящих состав Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

Для внедрения эффективных мероприятий по охране атмосферы, разработке рекомендаций по снижению уровня загрязнения, кроме сведений о сокращении выбросов с предприятий, требуется надежная информация за продолжительный период наблюдений о содержании загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, а также достоверные данные о климатических условиях их распространения в атмосфере.

Таким образом, первостепенное значение приобретает качество отбора проб атмосферного воздуха, а также надежность и достоверность определения концентраций примесей в воздухе горо-

дов в лабораториях региональных центров по гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды РФ (ЦГМС).

С целью установления достоверности выполняемых измерений концентраций примесей в воздухе городов страны и оценки имеющихся погрешностей их определения во всех ЦГМС осуществляется регулярный контроль качества данных наблюдений. Подобный контроль дает возможность исключить информацию, вызывающую сомнение и установить надежность средних арифметических и максимальных значений исследуемых характеристик на заданном уровне значимости.

При осуществлении критического контроля исходных данных наблюдений сотрудниками ЦГМС выполняется предварительная статистическая обработка результатов наблюдений за характеристиками загрязнения воздуха за предыдущие годы, устанавливаются критерии контроля, а также оцениваются закономерности пространственно-временных изменений концентраций исследуемых загрязняющих веществ. Эти критерии устанавливаются путем исследования однородного

временного ряда концентраций примесей, поэтому предварительно проводится проверка рассматриваемых рядов на однородность.

Следует подчеркнуть, что тенденция изменения уровня загрязнения атмосферного воздуха за продолжительный период времени, связанная с хозяйственной деятельностью, оценивается только для статистически однородных рядов. Далее статистически и климатологически однородные ряды используются для расчета статистических характеристик данных о загрязнении воздуха за многолетний период наблюдений, в том числе, для расчета значений фоновых концентрации примесей в атмосферном воздухе городов [5].

Стоит отметить, что выявленные в процессе обработки исходной информации сведения о погрешностях наблюдений за примесями в официальных публикациях региональных ЦГМС не освещаются и являются внутренней информацией необходимой для последующего анализа и корректировки первичных данных наблюдений.

В настоящей статье приведены результаты оценки погрешностей наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха г. Калуга, для чего была выполнена статистическая обработка первичных данных измерений разовых концентраций вредных примесей за последние 10 лет (2008-2017 гг.) на двух стационарных постах (ПНЗ № 1 и ПНЗ № 2) государственной системы наблюдения за состоянием окружающей среды Калужского ЦГМС – филиала ФГБУ «Центральное УГМ».

Калуга – город в европейской части России, расположенный в Центральном федеральном округе, с населением 340851 жителей по состоянию на 2018 год. В соответствии с требованиями РД 52.04.186-89 число стационарных постов в населенных пунктах, обеспечивающих репрезентативность данных наблюдений, определяется в зависимости от площади населенного пункта, численности населения в нем, учитывается также рельеф местности, степень индустриализации, расщедоточенности мест отдыха. Соответственно, в населенном пункте, попадающем в градацию 200-500 тыс. жителей должно быть установлено от 3 до 5 постов, и на момент организации сети мониторинга в 1984 году данное условие выполнялось, поскольку наблюдения за состоянием загрязнения атмосферного воздуха Калуги проводились на трех стационарных постах [4]. Однако, на современном этапе из-за отсутствия финансирования в городе сохранилось лишь два стационарных поста.

Упомянутые посты наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха условно подразделяются на «промышленный», который расположен вблизи от предприятий – это ПНЗ № 1 на ул. Азаровская, 26, и «авто», который размещается вблизи автомагистралей с интенсивным движением транспорта – это ПНЗ № 2 на ул. Хрустальная, 46 [2, 8].

По данным [1] такие предприятия и организации, как МУП «Калугагеплосеть», ОАО «Калужский турбинный завод», АО «Калужский завод «Ремпутьмаш», ООО «Газпром ПХГ» филиал Калужское управление подземного хранения газа, и другие вносят основной вклад в загрязнение атмосферного воздуха города. Также, в последние годы из-за постоянного увеличения автомобильного парка автотранспорт среди источников загрязнения атмосферы города занимает ведущее место. Отходящие газы двигателей внутреннего сгорания автомобилей содержат сложную смесь, в состав которой входит более двухсот компонентов, в том числе химические соединения, обладающие канцерогенными свойствами [8, 9].

В связи с этим основными примесями, которые отбираются на стационарных постах города Калуга – диоксид азота, диоксид серы, оксид азота, оксид углерода, фенол и формальдегид.

Мониторинг состояния загрязнения атмосферного воздуха на стационарных постах (ПНЗ № 1 и ПНЗ № 2) проводятся шесть дней в неделю, кроме воскресенья, в сроки 7.00, 13.00, 19.00 час. по Московскому времени по неполной программе (НП). За последние десять лет количество наблюдений в год за концентрациями примесей варьируется от 9210 в 2015 году до 10131 в 2010 году [2, 3].

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Критический контроль разовых и средних значений концентрации примесей показал отсутствие грубых ошибок, которые могли бы значительно исказить средние значения концентрации, что дало возможность продолжить дальнейшую оценку погрешности наблюдений, которая была выполнена путем статистического анализа временных рядов данных измерений.

Авторы методики [6], анализируя материалы наблюдений за загрязнением воздуха прошлых лет в различных городах бывшего СССР установили, что, как правило, для отдельных ПНЗ связь между значениями средней за месяц концентрацией примеси  $q$  и ее средним квадратическим отклонением  $s$  является линейной, поэтому ее обычно выражают следующим уравнением

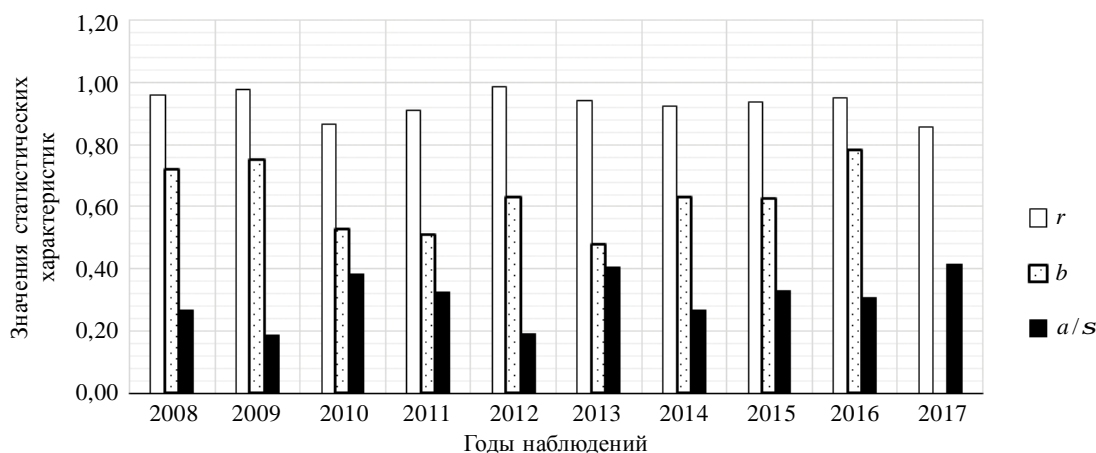


Рис. 1. Динамика статистических характеристик временного ряда концентраций взвешенных веществ

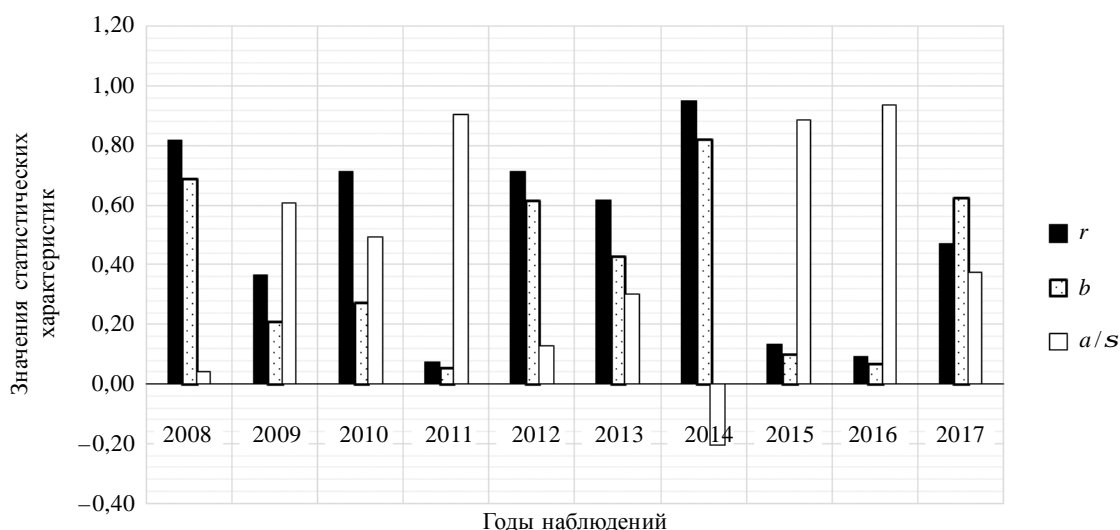


Рис. 2. Динамика статистических характеристик временного ряда концентраций диоксида серы

$$S_j = a + b \cdot \bar{q}_j. \quad (1)$$

Коэффициенты уравнения определяются методом наименьших квадратов:

$$a = \frac{\sum_{j=1}^J q_j^2 \sum_{j=1}^J S_j - \sum_{j=1}^J q_j \sum_{j=1}^J q_j S_j}{J \sum_{j=1}^J q_j^2 - (\sum_{j=1}^J q_j)^2}; \quad (2)$$

$$b = \frac{J \sum_{j=1}^J q_j S_j - \sum_{j=1}^J q_j \sum_{j=1}^J S_j}{J \sum_{j=1}^J q_j^2 - (\sum_{j=1}^J q_j)^2}, \quad (3)$$

где  $J$  – количество данных наблюдений за месяц.

Коэффициент  $b$ , входящий в уравнение регрессии (1), в случае отсутствия погрешности измерений, представляет собой коэффициент вариации концентраций примесей  $S/q$  и является показателем

надежности данных наблюдений. Коэффициент корреляции между  $S_j$  и  $q_j$  также является показателем достоверности выполнения измерений:

$$r = \frac{\overline{q_j S_j} - \bar{q}_j \bar{S}}{\sqrt{(q_j^2 - \bar{q}_j^2) \cdot (S_j^2 - \bar{S}^2)}}. \quad (4)$$

Считается, что при наличии значимой линейной связи между средними месячными значениями  $q_j$  и средними квадратическими отклонениями  $S_j$  коэффициент корреляции должен колебаться в пределах 0,6-0,9.

Таким образом, обработка результатов измерения содержания примесей в воздухе включает расчет коэффициента корреляции  $r$  между средними месячными значениями концентраций  $q_j$  и их средними квадратическими отклонениями  $S_j$ , коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения (1), среднего значения концентраций примесей за  $J$  месяцев и среднего из средних квадратических отклонений:

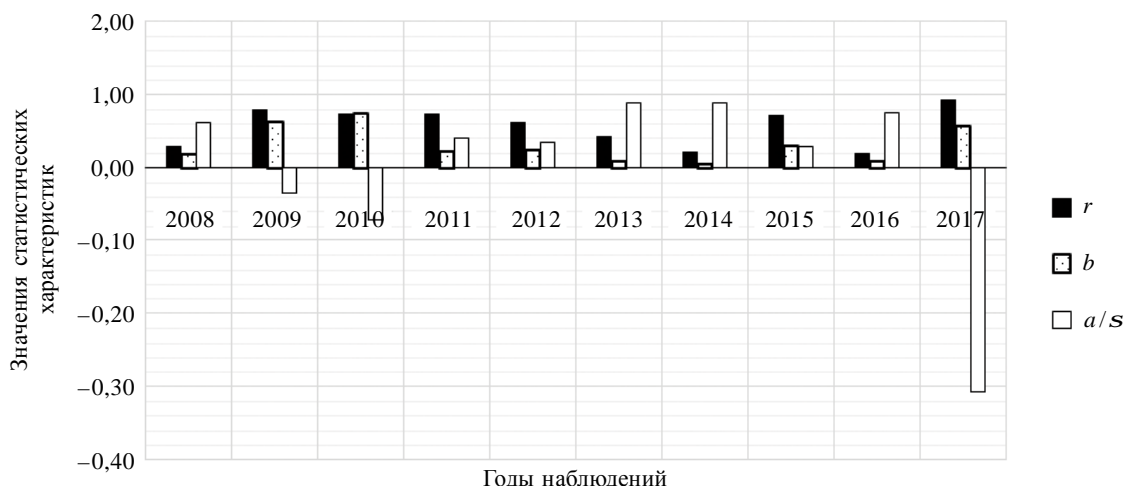


Рис. 3. Динамика статистических характеристик временного ряда концентраций оксида углерода

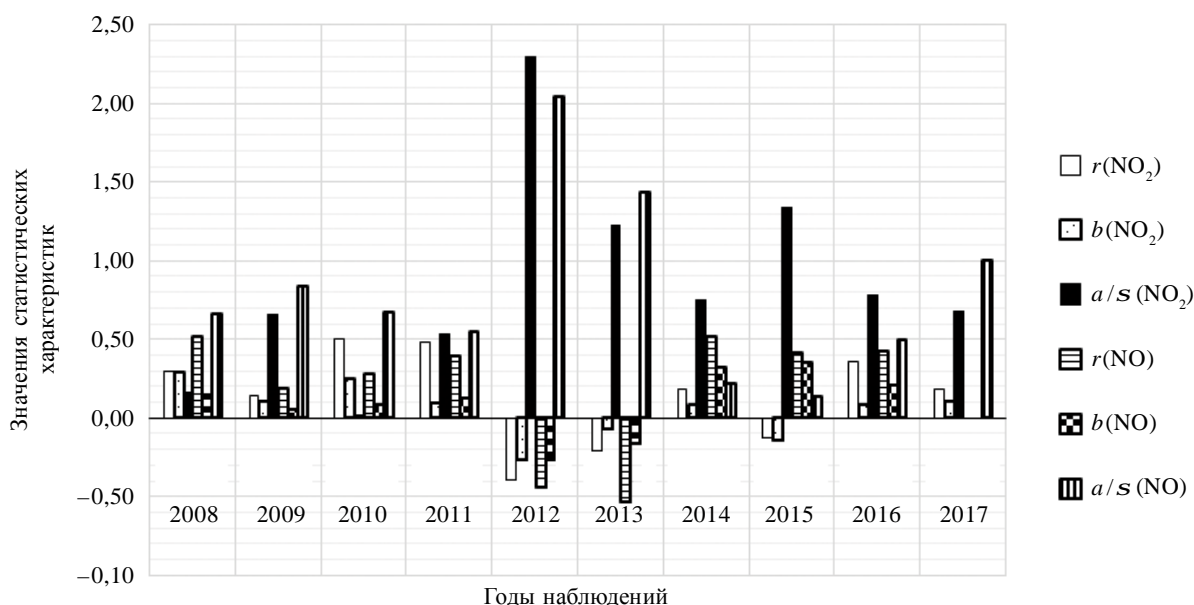


Рис. 4. Динамика статистических характеристик временного ряда концентраций диоксида азота (NO<sub>2</sub>) и оксида азота (NO)

$$\bar{s} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J s_j \quad (5)$$

Если в данных наблюдений существуют погрешности измерений, то коэффициент  $a$  представляет собой среднюю квадратическую ошибку наблюдений,  $a/s$  – относительное значение, а  $|e|$  – среднюю абсолютную ошибку:

$$|e| = a/b \quad (6)$$

Для оценки надежности характеристик временных рядов измеренных концентраций примесей в зависимости от значений  $r$  и  $b$ , а также их сочета-

ний авторами [5, 6, 7] разработаны следующие рекомендации:

1. При  $r > 0,7$  и  $0,8 < b < 1,5$  погрешность  $a/s < 0,2$  – результаты определения концентраций примеси считаются достоверными с малой погрешностью наблюдений, которая не сказывается на установлении средних характеристик ряда. Особенно, если они получены по длинному ряду наблюдений (3-5 лет) при  $J \geq 36$ , то тогда весь ряд наблюдений однороден.

2. При  $r > 0,5$  и  $b \geq 1$  погрешность  $a/s \approx 0,2-0,4$  – результаты измерений могут содержать случайные ошибки, которые приводят к погрешностям оп-

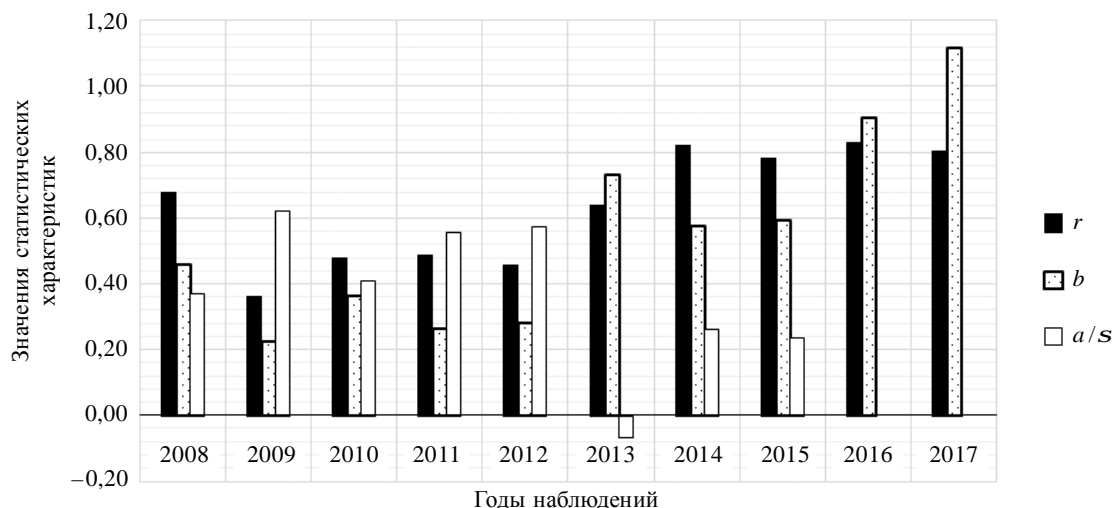


Рис. 5. Динамика статистических характеристик временного ряда концентраций формальдегида

ределения концентраций примеси и других характеристик загрязнения атмосферы. Ряд наблюдений считается однородным.

3. При  $0,5 < r < 0,7$  и  $b < 0,5$  погрешность  $a/s > 0,4$  – встречается некоторое завышение концентраций примесей и наличие случайных ошибок.

4. При  $r < 0,5$  и  $b < 0,5$  погрешность  $a/s > 0,4$  – данные наблюдений вызывают сомнение, поскольку такие сочетания статистических характеристик обусловлены наличием случайных погрешностей в наблюдениях, в результате которых  $S_j$  значительно превышает  $q_j$ , что может быть обусловлено систематической погрешностью в наблюдениях в течение некоторого периода.

5. При  $0,5 < r < 0,7$  и  $0,5 < b < 0,8$  погрешность  $a/s$  определения концентраций может принимать большие значения из-за систематической и случайной погрешностей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеризуя результаты измерения содержания примесей в годовом разрезе, следует отметить, что ряды наблюдений за взвешенными веществами (рис. 1) являются однородными и достоверными с малыми погрешностями измерений, поскольку  $r > 0,8$  и  $b = 0,53 \div 0,78$ , а погрешность  $a/s < 0,4$ .

Полученные при обработке рядов наблюдений за концентрациями диоксида серы статистические характеристики характеризуются значительным разнообразием (рис. 2). В 2008, 2010, 2012, 2013 годах ряды можно считать достоверными, характеризующимися малой погрешностью наблюдений, в 2015 и 2016 году данные наблюдений вызывают сомнение, поскольку  $r < 0,5$ ,  $b < 0,5$ ,  $a/s > 0,4$ . В

остальные годы ни одно из приведенных выше сочетаний для оценки надежности данных не встречается.

В 2011, 2015 годах данные наблюдений за содержанием оксида углерода (рис. 3) соответствуют следующим сочетаниям  $0,5 < r < 0,7$  и  $b < 0,5$ , погрешность  $a/s > 0,4$ , а значит ряд характеризуется завышенными значениями и наличием случайных погрешностей. В 2008, 2013, 2014, 2016 годах ряды содержат случайные и систематические погрешности наблюдений. В 2009, 2010, 2017 годах получившиеся сочетания характеристик не соответствуют рекомендуемым.

Содержание диоксида и оксида азота в атмосферном воздухе города подвержено значительным колебаниям, что подтверждается результатами статистической обработки данных наблюдений (рис. 4). Полученные в 2008, 2009, 2011 годах результаты свидетельствуют о завышении концентрации примесей и возникших случайных ошибках, поскольку  $0,5 < r < 0,7$ ,  $b < 0,5$ , а погрешность  $a/s > 0,4$ . В рядах наблюдений за 2014, 2016, 2017 годы в большинстве случаев среднее квадратическое отклонение значительно превышает значения концентраций диоксида и оксида азота, что обусловлено наличием случайных погрешностей в наблюдениях и соответствует следующему сочетанию характеристик  $r < 0,5$ ,  $b < 0,5$  и  $a/s > 0,4$ . В 2010 (для ряда  $\text{NO}_2$ ), 2012, 2013 и 2015 годах наблюдаются сочетания статистических характеристик, которые не описываются приведенными в методике сочетаниями.

В 2009-2011 и 2016 годах полученные в результате обработки статистические характеристики

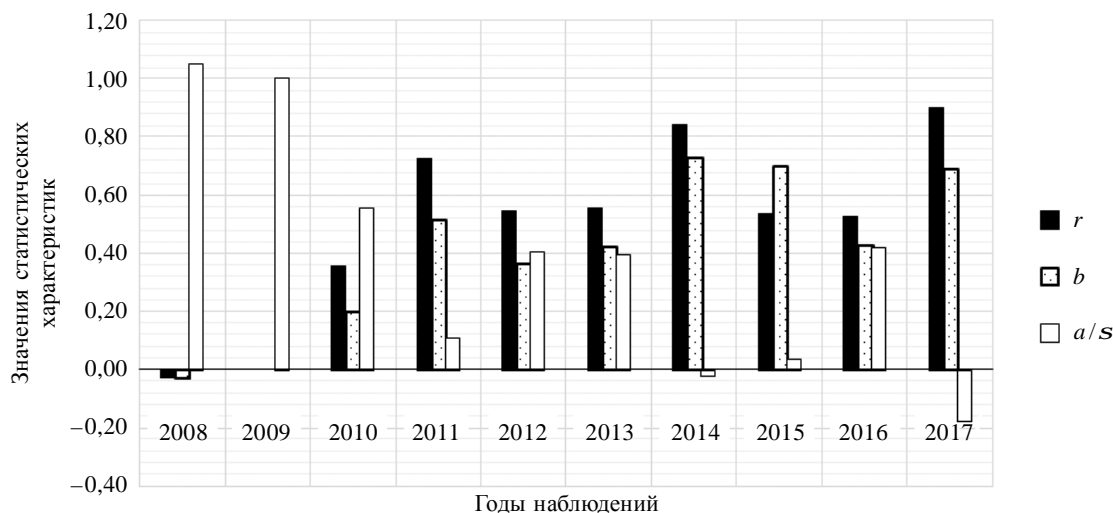


Рис. 6. Динамика статистических характеристик временного ряда концентраций фенола

$0,5 < r < 0,7$  и  $b < 0,5$ , погрешности  $a/s > 0,4$  свидетельствуют о завышении концентраций формальдегида и наличии случайных ошибок (рис. 5). В 2016 и 2017 годы ряды наблюдений являются однородными и достоверными с чрезвычайно малыми погрешностями ( $a/s < 0,4$ ). В остальные годы сочетания характеристик не соответствуют рекомендуемым в методике.

Данные наблюдений за концентрациями фенола в атмосферном воздухе, кроме 2011 года, характеризуются невысокой надежностью (рис. 6), что обусловлено наличием случайных погрешностей измерения.

Известно, что использование большего ряда наблюдений, взятого для статистической обработки, увеличивает достоверность определяемых статистических характеристик, поэтому в таблице представлены результаты оценки погрешности наблюдений за многолетний период ( $J = 120$  месяцев).

Анализируя результаты, представленные в таблице следует отметить, что за десятилетний период наблюдений значимыми линейными связями характеризуются ряды наблюдений за взвешенными веществами, диоксидом серы, фенолом и формальдегидом. Наибольшим относительным значением средней квадратической ошибки  $a/s$  за рассматриваемый период характеризуются ряды наблюдений за оксидом и диоксидом азота.

Согласно методике [5] ряд наблюдений надежен, концентрации примесей считаются достоверными с малой погрешностью измерений, если  $r > 0,7$  и  $0,8 < b < 1,5$ , погрешность  $a/s < 0,2$ . Среди исследуемых рядов наблюдений ни один не соответствует данному сочетанию статистических характеристик.

При  $r > 0,5$ ,  $b \geq 1$  и погрешности  $a/s = 0,2-0,4$  ряд наблюдений также является достоверным, однако, считается, что результаты наблюдений содержат случайные ошибки, которые приводят к погрешностям в определении концентрации примесей и других характеристик загрязнения атмосферы. Таких рядов при исследовании результатов определения примесей не обнаружилось.

Содержание в атмосферном воздухе города оксида углерода за многолетний период наблюдений соответствует условию  $0,5 < r < 0,7$ ,  $b < 0,5$ , когда встречается некоторое завышение концентраций примесей и случайных ошибок определения, ряд данных является однородным, однако, имеется небольшая погрешность наблюдений, значение которой соответствует второму условию методики.

Ряды наблюдений за концентрациями оксида и диоксида азота характеризуются невысоким значением коэффициента корреляции между средними концентрациями данных химических веществ и их средними квадратическими отклонениями ( $r < 0,5$ ), значительными значениями относительной погрешности ( $a/s > 0,4$ ), что обусловлено наличием случайных или систематических погрешностей. Такие данные наблюдений вызывают сомнение, их рекомендуется пересмотреть, исключив недостоверные данные измерений. В рассматриваемом случае такие результаты могут объясняться переходом в 2015 году на новую методику определения содержания оксидов азота в воздухе.

Наблюдения за многолетним содержанием фенола характеризуются сложными сочетаниями статистических характеристик. С одной стороны это свидетельствует о достаточно достоверной связи между содержанием примеси и ее средним квад-

Результаты статистической обработки концентраций примесей в атмосферном воздухе города Калуга за период 2008-2017 годы

Примесь	$r$	$b$	$a$	$ e $	$s$	$ e /\bar{q}_j$	$a/s$
Взвешенные вещества	0,947	0,6071	0,029	0,048	0,094	0,445	0,308
Диоксид азота	0,095	0,0255	0,027	1,044	0,029	10,635	0,914
Диоксид серы	0,790	0,4429	0,001	0,00185	0,002	0,518	0,341
Формальдегид	0,691	0,5782	0,0004	0,0008	0,003	0,152	0,132
Оксид азота	0,070	0,0235	0,009	0,395	0,010	13,863	0,933
Фенол	0,816	0,6629	-0,0001	0,0002	0,003	0,056	-0,059
Оксид углерода	0,530	0,3217	0,120	0,360	0,490	0,310	0,24

ратическим отклонением, а, с другой стороны, отрицательное значение параметра  $a$  может свидетельствовать о том, что концентрации исследуемого вещества были ниже нижней границы диапазона измерений, используемого для их определения РД 52.04.799-2014. Следовательно, в рядах наблюдений присутствует систематическая погрешность, завышающая значения средних концентраций.

Ряд наблюдений за содержанием в атмосферном воздухе формальдегида характеризуется следующими сочетаниями статистических характеристик  $0,5 < r < 0,7$  и  $0,5 < b < 0,8$ , что предположительно объясняется переходом в 2016 году на новую методику определения формальдегида РД 52.04.824-2015.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, результаты оценки погрешности наблюдений за примесями в атмосферном воздухе города Калуга можно сделать следующие выводы.

1. Ряды наблюдений за взвешенными веществами можно считать однородными и достоверными с малыми погрешностями измерений на протяжении исследуемого периода, поскольку  $r > 0,8$  и  $b = 0,48 \div 0,78$ , а погрешность  $a/s \leq 0,4$ .

2. Ряды наблюдений за остальными примесями до 2014 года в 33 % случаев характеризуются следующими значениями и сочетаниями статистических характеристик:  $0,5 < r < 0,7$  и  $b < 0,5$  погрешность  $a/s > 0,4$ , что возможно при некотором завышении концентрации примесей и наличии случайных ошибок.

3. Ряды наблюдений за примесями в 2014-2017 годах характеризуются в 13 % случаев следующими сочетаниями статистических характеристик  $r < 0,5$  и  $b < 0,5$ , погрешность  $a/s > 0,4$ , что означает наличие систематической или случайной погрешностей в определении концентраций.

4. Встречаются многочисленные случаи (36 %), когда среди исследуемых рядов наблюдений ни одно сочетание статистических характеристик не соответствует рекомендуемому в методике [5, 6, 7].

Можно предположить, что наличие погрешностей наблюдения в концентрациях, определяемых примесями, обусловлено, во-первых, переходом на новые редакции методик количественного химического анализа, в которых по-прежнему не определены пределы обнаружения концентраций, во-вторых, тем, что количественное значение концентраций примеси в атмосфере зависит, в большой степени, от качественного отбора проб на постах. Сами результаты непосредственного лабораторного определения концентраций жестко контролируются методиками количественного химического анализа, которые предполагают выполнение процедур контроля качества результатов измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2017 году. – Калуга, 2018. – 263 с.
2. Ежегодник состояния загрязнения атмосферного воздуха на территории деятельности Калужского ЦГМС – филиала ФГБУ «Центральное УГМС» за 2017 г. – Калуга, 2018. – 20 с.
3. Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2016 г. – Санкт-Петербург, 2017. – 227 с.
4. Климат Калуги / под ред. Ц. А. Швер, А. И. Неушкина. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. – 128 с.
5. Руководящий документ РД 52.04.667-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. – Москва, 2006. – 52 с.
6. Руководящий документ РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – Москва, 1991. – 694 с.

7. Смирнова И. В. Методология оценки достоверности и интерпретация результатов наблюдений за концентрациями примесей в атмосфере городов России : автореф. дис. ... канд. геогр. наук / И. В. Смирнова. – Санкт-Петербург, 2007. – 20 с.

8. Состояние и охрана окружающей среды в Калуге : сборник материалов. – Калуга : Экоаналитика, 2016. – 80 с.

9. Факторная структура примесей в атмосферном воздухе города Калуга / М. В. Захарова [и др.] // Вестник Калужского университета. – 2017. – № 2. – С. 59-64.

#### REFERENCES

1. Doklad o sostoyanii prirodnykh resursov i okhrane okruzhayushchey sredy na territorii Kaluzhskoy oblasti v 2017 godu. – Kaluga, 2018. – 263 s.

2. Ezhegodnik sostoyaniya zagryazneniya atmosferno-go vozdukha na territorii deyatel'nosti Kaluzhskogo TsGMS – filiala FGBU «Tsentral'noe UGMS» za 2017 g. – Kaluga, 2018. – 20 s.

3. Ezhegodnik sostoyaniya zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2016 g. – Sankt-Peterburg, 2017. – 227 s.

4. Klimat Kalugi / pod red. Ts. A. Shver, A. I. Neushkina. – Leningrad : Gidrometeoizdat, 1989. – 128 s.

5. Rukovodyashchiy dokument RD 52.04.667-2005. Dokumenty o sostoyanii zagryazneniya atmosfery v gorodakh dlya informirovaniya gosudarstvennykh organov, obshchestvennosti i naseleniya. Obshchie trebovaniya k razrabotke, postroeniyu, izlozheniyu i soderzhaniyu. – Moskva, 2006. – 52 s.

6. Rukovodyashchiy dokument RD 52.04.186-89 Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery. – Moskva, 1991. – 694 s.

7. Smirnova I. V. Metodologiya otsenki dostovernosti i interpretatsiya rezul'tatov nablyudeniya za kontsentratsiyami primesey v atmosfere gorodov Rossii : avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk / I. V. Smirnova. – Sankt-Peterburg, 2007. – 20 s.

8. Sostoyanie i okhrana okruzhayushchey sredy v Kaluge : sbornik materialov. – Kaluga : Ekoanalitika, 2016. – 80 s.

9. Faktornaya struktura primesey v atmosfernom vozdukhe goroda Kaluga / M. V. Zakharova [i dr.] // Vestnik Kaluzhskogo universiteta. – 2017. – № 2. – S. 59-64.

Захарова Марина Владимировна  
кандидат географических наук, преподаватель Калужского колледжа народного хозяйства и природообустройства, г. Калуга, E-mail: [maryno4ka80@gmail.com](mailto:maryno4ka80@gmail.com)

Zakharova Marina Vladimirovna  
Candidate of Geographical Sciences, Lecturer at the Kaluga College of National Economy and Environmental Engineering, Kaluga, E-mail: [maryno4ka80@gmail.com](mailto:maryno4ka80@gmail.com)