

УДК 674.093

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УДЛИНЯЮЩЕГОСЯ РЯДА НАБЛЮДЕНИЙ
ЗА КИСЛОТНОСТЬЮ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ В ТВЕРИ****Ф.В. Качановский***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2023

Аннотация. Проведен статистический анализ динамики кислотности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 1990–2022 гг. Установлено, что в последние 5–6 лет наблюдавшееся ранее снижение значений водородного показателя кислотности осадков pH прекратилось. Еще раз подтверждена обоснованность применения полиномиальных моделей для анализа тренда ряда pH . Сделан вывод, что внутригодовая динамика кислотности осадков за последние 9 лет изменилась несущественно. Установлено, что температура воздуха статистически значимо влияет на колебания кислотности осадков.

Ключевые слова: кислотность, атмосферные осадки, модель, временной ряд, тренд, циклическая компонента, сезонная компонента, случайная компонента, показатель кислотности pH .

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-79-88

Состояние природной среды во многом определяется кислотностью атмосферных осадков, поэтому показатель кислотности pH служит одной из важных экологических характеристик. Лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии с 1990 г. ведет в Твери наблюдения за кислотностью атмосферных осадков, измеряя значения pH . Автор настоящей статьи начиная с 2009 г. использует полученные лабораторией результаты для проведения статистического анализа показателя pH и регулярно публикует результаты [1–10].

Срочные значения показателя pH , зафиксированные с 1990 по 2022 г., преобразуются в среднемесячные значения, множество которых образует временной ряд длиной в 33 года с постоянным (месячным) шагом. Число членов (месяцев) ряда наблюдений достигло 396. Члены ряда обозначаются как $ampH$ ($am = average month$, т.е. среднемесячные значения), а номера членов ряда – как t . Временной ряд значений $ampH$ подвергается статистическому анализу.

Ряд $ampH$ в интервале 1990–2022 гг. представлен на рис. 1. Значения $ampH$ за период наблюдений находились в диапазоне 4,3–7,8 единиц.

При сравнительно равномерных колебаниях $ampH$ с течением времени происходит постепенное уменьшение их значений. С октября 2005 г. до февраля 2009 г. равномерные колебания $ampH$ нарушает интервенция (вмешательство в процесс) некоторого фактора неизвестного происхождения. Интервенция (она хорошо видна на рис. 4) проявляется в удвоении амплитуды колебаний $ampH$ и продолжается более 3 лет.

При анализе последовательность значений $ampH$ рассматривается как нестационарный временной ряд. С учетом результатов предыдущих исследований [1–5]

модель ряда $amrH$ принята состоящей из четырех аддитивных компонент: трех детерминированных (циклической, сезонной и тренда) и одной случайной [11].

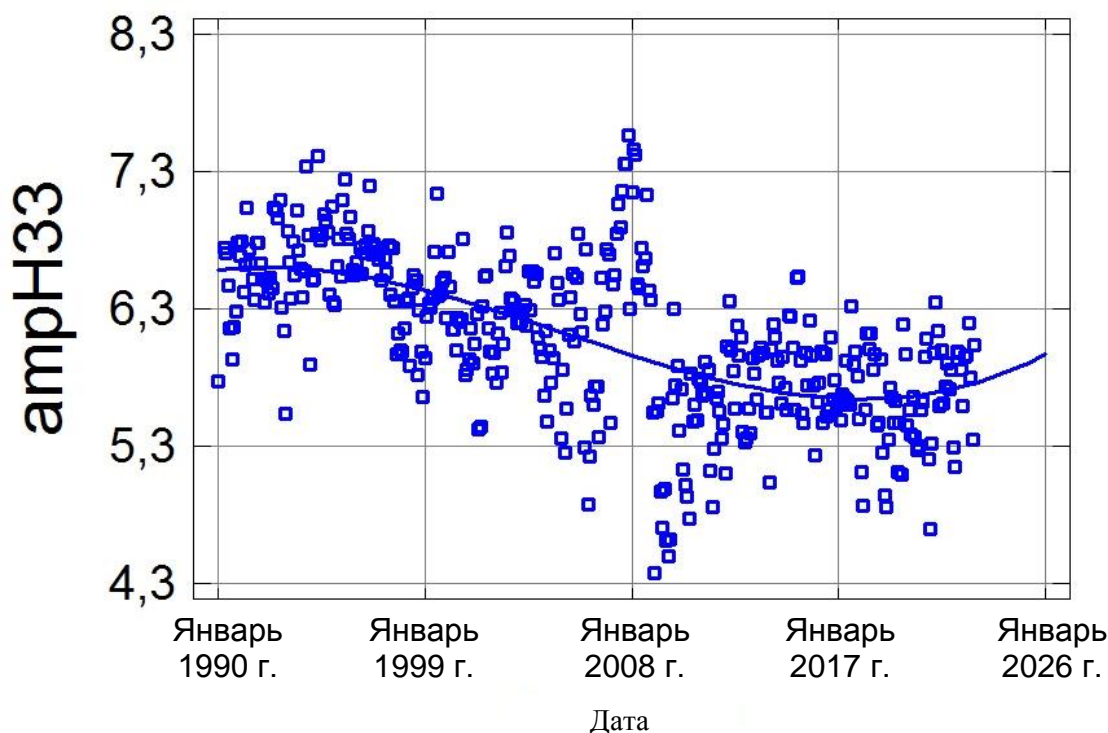


Рис. 1. Ряд $amrH33$ (1990–2022 гг.) и его кубический тренд

Тренды рядов $amrH$ разной длины показывают, что в течение почти 30 лет среднемесячные значения $amrH$ снижались, т.е. кислотность атмосферных осадков, выпадающих в Твери, росла. При этом скорость снижения $amrH$ с 2002 г. начинает уменьшаться. Это проявилось в появлении точек перегиба на линиях трендов. Срединная часть линий кубических трендов (1995–2010 гг.) сравнительно устойчива и демонстрировала постепенное уменьшение значений $amrH$.

Тренды рядов четырех последних лет (30–33 года) описываются уравнениями:

$$tr_{30} = 6,588\ 96 + 0,001\ 475\ 41 \cdot t - 0,000\ 033\ 498\ 7 \cdot t^2 + 0,619\ 26 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (1)$$

$$tr_{31} = 6,603\ 84 + 0,000\ 891\ 642 \cdot t - 0,000\ 028\ 762 \cdot t^2 + 0,518\ 763 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (2)$$

$$tr_{32} = 6,590\ 31 + 0,001\ 397\ 48 \cdot t - 0,000\ 032\ 665\ 5 \cdot t^2 + 5,974\ 83 \cdot 10^{-8} \cdot t^3; \quad (3)$$

$$tr_{33} = 6,583\ 29 + 0,001\ 650\ 48 \cdot t - 0,000\ 034\ 545\ 3 \cdot t^2 + 6,339\ 63 \cdot 10^{-8} \cdot t^3; \quad (4)$$

где t – порядковый номер месяца в ряду.

Уравнения (1)–(4) показывают, что при удлинении ряда $amrH$ коэффициенты кубической модели тренда изменяются несущественно и немонотонно. Свободный член у 31-летнего ряда несколько больше, чем у остальных рядов, а абсолютные значения других коэффициентов ряда, наоборот, имеют значения, меньшие, чем у других рядов.

На большей (срединной) части своей длины тренды практически совпадают [1–10] и единообразно описывают моделируемую временную последовательность. Только на концевом участке модель тренда заметно реагирует на удлинение ряда.

Перегиб линий тренда, с которого начинает уменьшаться скорость снижения значений $ampH$, т.е. момент времени, когда скорость снижения перестает расти, по мере удлинения ряда наступает все позже.

Минимум тренда 30-летнего ряда ($ampH = 5,651\ 84$) наступает при $t = 337$ (в январе 2018 г.), т.е. достигается за 23 мес. до конца ряда. Затем начинается ускоренный рост значений $ampH$, продолжающийся до конца периода наблюдений. Минимум одного модельного тренда не означает, разумеется, что реальный процесс снижения значений показателя $ampH$ остановился. Это становится очевидным из дальнейшего рассмотрения трендов более длинных рядов. Так, тренд 31-летнего ряда достигает своего минимума ($ampH = 5,616\ 48$) в мае 2019 г., т.е. за 19 мес. до конца ряда, 32-летнего ряда ($ampH = 5,637\ 59$) – в июне 2018 г. (42 мес. до конца ряда). При этом значение минимума 32-летнего ряда оказывается несколько больше, чем у 31-летнего. Наконец, минимум 33-летнего ряда ($ampH = 5,642\ 57$) наступает в феврале 2018 г., т.е. за 58 мес. до конца ряда. Это означает, что концевой участок тренда все более расплывается. Такое соотношение параметров сравниваемых рядов позволяет предположить, что минимум среднемесячных значений показателя кислотности $ampH$ был практически достигнут в конце 2017 г., но не позже апреля 2018 г. Об этом же свидетельствуют минимумы концевых участков трендов 30-летнего и 33-летнего рядов $ampH$, показанных на рис. 2.

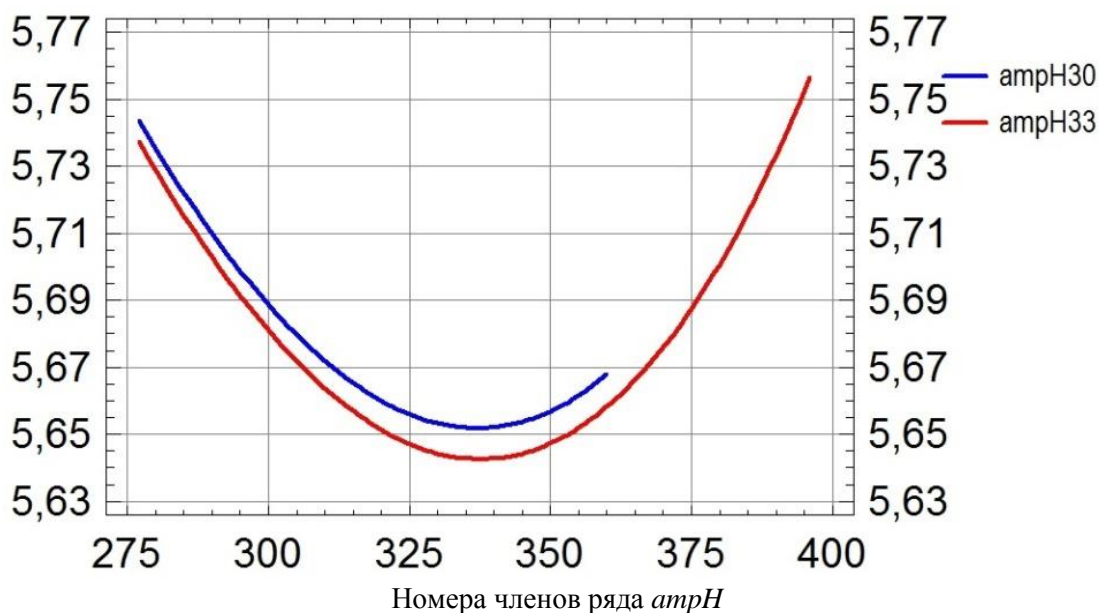


Рис. 2. Концевые участки трендов $ampH30$ и $ampH33$

Рассмотренный материал показывает, что применение кубического тренда обеспечило локализацию (обнаружение) максимума кислотности в исследуемом ряду pH благодаря графической простоте тренда. Представляется, однако, интересной и важной возможностью использования для этой цели полиномиального тренда более высокой, 4-й, степени. Уравнение тренда имеет вид

$$trf_{33} = 6,519\ 36 + 0,004\ 696\ 44 \cdot t - 0,000\ 068\ 449\ 3 \cdot t^2 + 1,951\ 16 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 1,651\ 31 \cdot 10^{-10} \cdot t^4.$$

График тренда 4-й степени показан на рис. 3 вместе с графиком кубического тренда. Срединная часть обоих трендов практически совпадает. У кубического тренда локальные экстремумы (максимум и минимум) наступают несколько раньше, чем у тренда указанной степени. Можно считать, что оба тренда приемлемо точно описывают динамику кислотности атмосферных осадков. Таким образом, пока отсутствует необходимость использовать полиномиальную модель 4-й степени в статистическом анализе.

Сезонная декомпозиция 33-летнего ряда $атрН$ (1990–2022 гг.) позволила выделить из ряда тренд и его сумму с циклической компонентой (рис. 4). Из этой суммы вычтен тренд, и таким образом получена циклическая компонента, которая в виде отклонений от нулевых значений дана на рис. 5.

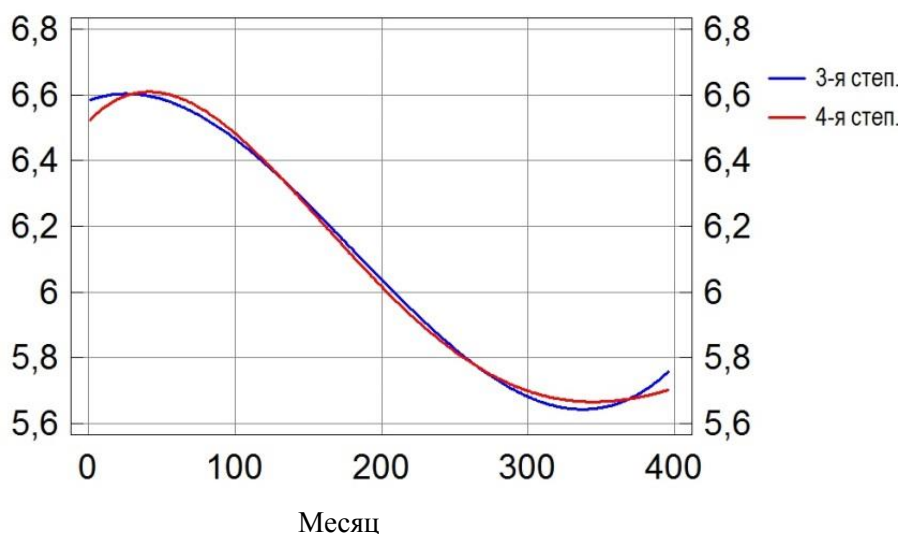


Рис. 3. Полиномиальные тренды $атрН33$ 3-й и 4-й степеней

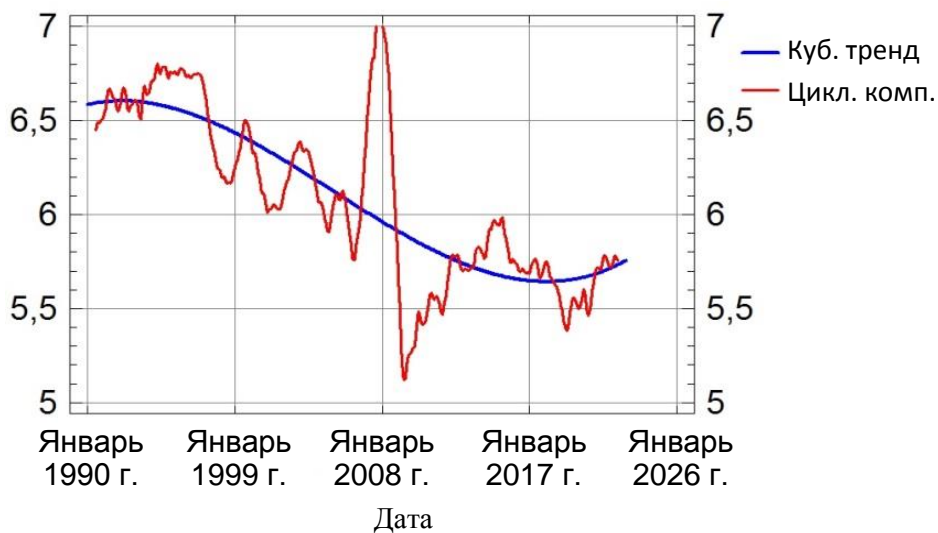


Рис. 4. Кубический тренд и сумма тренда с циклической компонентой ряда $атрН33$ (1990–2022 гг.)

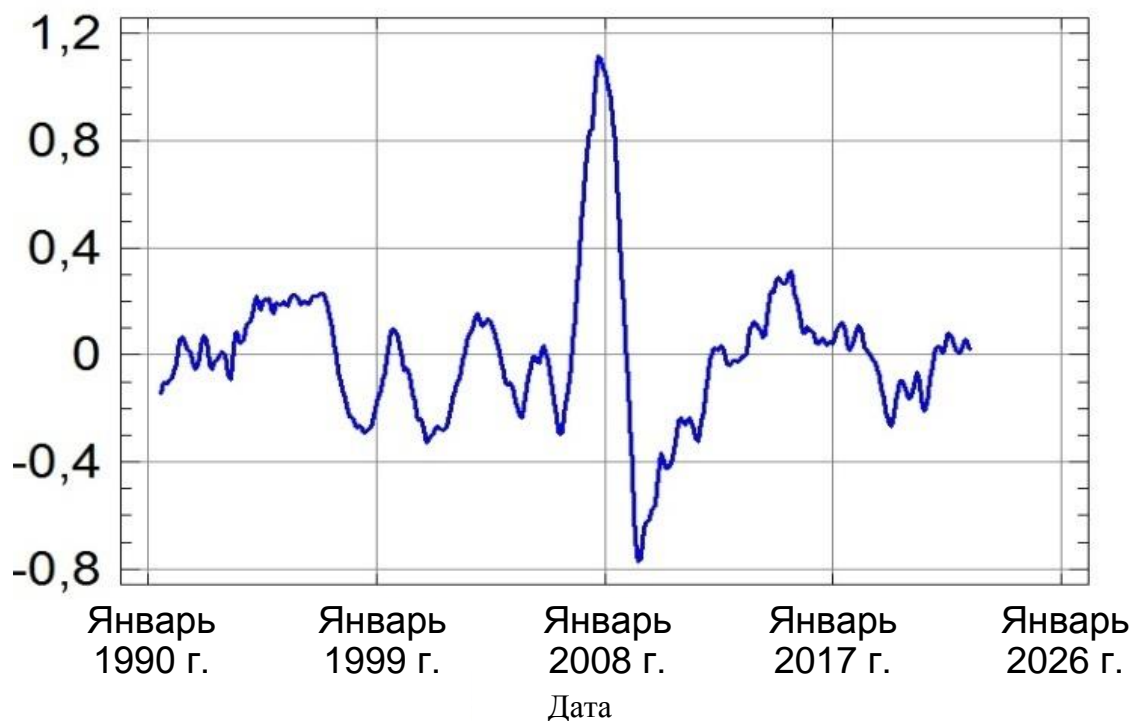
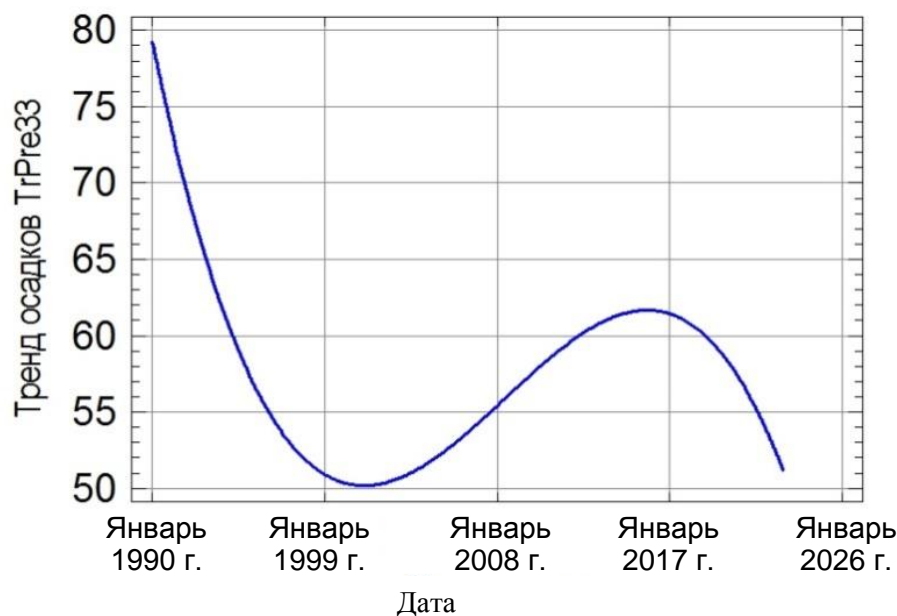


Рис. 5. Циклическая компонента ряда $ampH33$ (1990–2023 гг.)

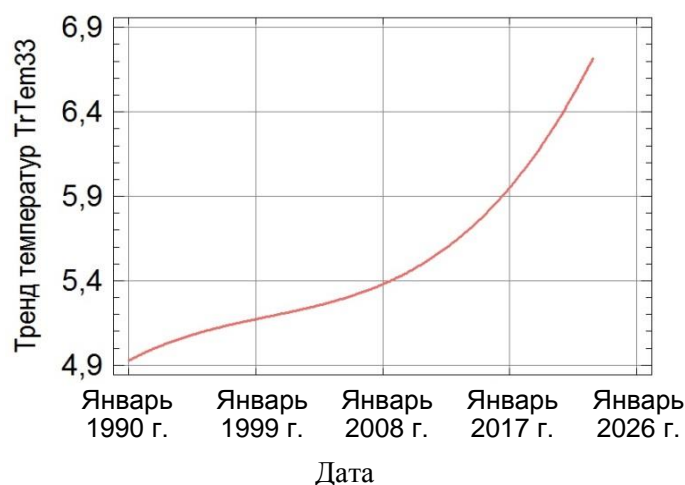
При удлинении ряда наблюдений показателя pH на год (2022-й) характерные черты циклической компоненты остались прежними. Видна не только интервенция 2005–2009 гг., но также «мини-интервенция», приходящаяся на 2015 г. и обсужденная в [9]. Отметим, что разброс значений у циклической компоненты $ampH33$ значительно меньше, чем у исходного ряда и составляет $\sim 1,1$ единиц по сравнению с разбросом значений $ampH32$ в диапазоне $\sim 1,8$. В [9] уже отмечалась условность самого названия этой компоненты («циклическая») применительно к показателю кислотности pH . Величина pH изменчива как по амплитуде колебаний, так и по протяженности циклов. Амплитуда ее изменяется в пределах $0,1-0,53$, а протяженность циклов составляет 1–3 года.

Рассмотрим связь тренда $ampH33$ с трендами метеофакторов, способных оказать влияние на динамику кислотности осадков. На рис. 6 представлен кубический тренд осадков $TrPre33$, а на рис. 7 – температур воздуха $TrTem33$. Оба тренда получены по той же методике, что и тренд $ampH33$.

На тренде осадков отчетливо выступают локальный минимум, приходящийся на февраль 2001 г. (134-й мес. ряда), и локальный максимум, соответствующий ноябрю 2015 г. (311-й мес. ряда). Тренд температур воздуха монотонно возрастающий, с выраженным слабо перегибом в точке, близкой по времени наступления к минимуму тренда осадков.

Рис. 6. Кубический тренд осадков $TrPre33$, мм

Линейная корреляция трендов показателя кислотности $ampH33$ и атмосферных осадков $Pre33$ характеризуется отрицательным значением $-0,023\ 474$. Оно указывает на отсутствие статистически значимой связи между трендами на 90%-м (или выше) доверительном уровне. Заметим попутно, что линейная связь между показателем кислотности $ampH33$ и атмосферными осадками $Pre33$ статистически значима и характеризуется коэффициентом корреляции $-0,071\ 087\ 2$ на 90%-м (и выше) доверительном уровне.

Рис. 7. Кубический тренд ряда температур $TrTem33$

Линейная корреляция трендов $ampH33$ и температуры воздуха $TrTem33$ определяется отрицательным коэффициентом корреляции, равным $-0,847\ 666$; этот

коэффициент указывает на умеренно сильную связь между трендами и статистически значим на 90%-м и выше доверительном уровне. Уравнение корреляции трендов имеет вид

$$tr_{33} = 9,800\ 28 - 0,675\ 874 \cdot TrTem33.$$

Связь между показателем кислотности $ampH33$ и температурой воздуха $Tem33$ определяется положительным коэффициентом корреляции 0,117 559. Коэффициент указывает на существование связи, хотя и сравнительно слабой, но статистически значимой на 95%-м доверительном уровне.

Таким образом, линейная корреляция между рядами показателя кислотности и атмосферных осадков, а также между рядами их кубических трендов статистически не значима. Корреляция же между рядами показателя кислотности и температур воздуха, а также между рядами их кубических трендов статистически значима. Есть основание для утверждения о том, что температура воздуха – важный фактор влияния на колебания кислотности осадков.

Внутригодовую динамику показателя $ampH$ характеризуют месячные индексы, определяемые как простое среднее \hat{s}_i отклонений значений $ampH$ от тренда [8, 11]:

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (ampH_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp}) \text{ для } i=1, \dots, p; \quad (5)$$

где $m+1$ – число периодов (лет) в ряду наблюдений.

На рис. 8 представлены месячные индексы рядов $ampH$ длиной 33, 23 и 13 лет, рассчитанные по формуле (5). Графики индексов 33-летнего и 23-летнего рядов достаточно близки друг к другу, локальные максимумы и минимумы их совпадают по времени. График индексов 13-летнего ряда отличается от них только в 7-м мес., где ему соответствует глобальный максимум, в то время как у двух других рядов в 7-м мес. оказывается один из локальных минимумов, а глобальный максимум наступает в сентябре, т.е. двумя месяцами позже, что труднообъяснимо.

Моделирование случайной компоненты $X(t)$ ряда $ampH33$ производилось так же, как и для более коротких рядов [1–10]: использовался комбинированный случайный процесс авторегрессии-скользящего среднего ARMA(p, q) [11], параметры p и q которого означают порядок процессов авторегрессии и скользящего среднего.

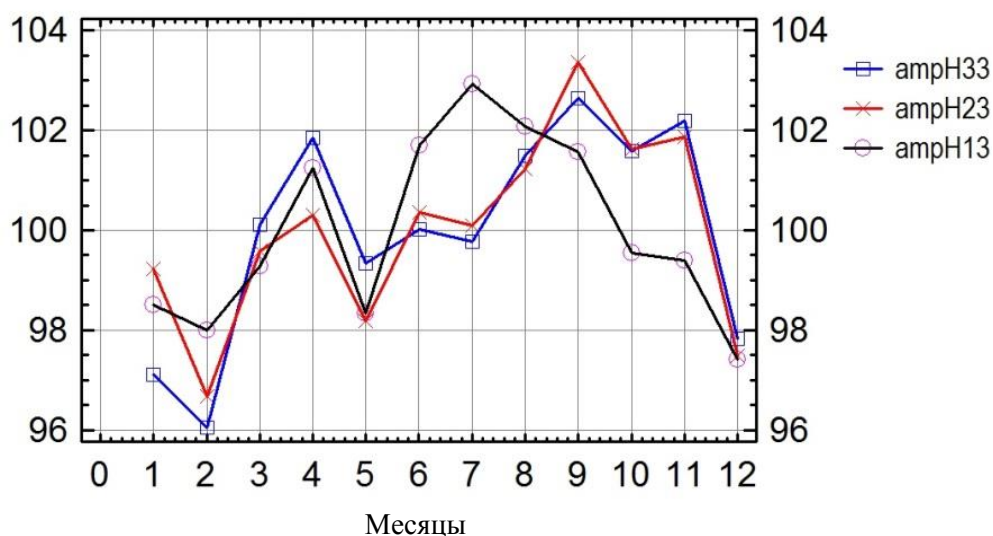


Рис. 8. Сезонные индексы рядов $ampH33$, $ampH23$ и $ampH13$

Модель имеет вид

$$X(t) = \sum_{i=1}^p \varphi_i \cdot X(t-i) + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q \theta_j \cdot \varepsilon_{t-j},$$

где ε_t – процесс белого шума (в котором среднее $M\varepsilon_t = 0$, дисперсия $D\varepsilon_t = 0$); φ – авторегрессионные коэффициенты; θ – коэффициенты скользящего среднего.

При доверительной вероятности 90 % адекватность описания случайного остатка 33-летнего ряда *атрН* достигается при $p = 3$ и $q = 2$, т.е. при тех же значениях, что и для ряда длиной 32 года (2010–2021 гг.). Это указывает на короткую (около 3 мес.) «память» у исследуемой величины.

ВЫВОДЫ

Исследование удлинившегося еще на один год (33-летнего) ряда наблюдений за показателем *рН* кислотности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 1990–2022 гг., показало, что существенное снижение среднемесячных значений этого показателя практически прекратилось. В течение 5–6 последних лет (2015–2021 гг.) средние значения показателя кислотности *рН* колебались в пределах 5,6–5,8, т.е. временной ряд стабилизировался.

Принятая с 26-летнего ряда кубическая модель тренда остается пригодной и для удлинившегося, 33-летнего, ряда. Однако полиномиальная модель 4-й степени тоже оказывается адекватной и готова сменить кубическую модель.

Судя по корреляции между рядами показателя кислотности и температур воздуха, а также между рядами их кубических трендов, можно утверждать, что температура воздуха – статистически значимый фактор влияния на колебания кислотности осадков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качановский Ф.В. Динамика кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери (статистический анализ) // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2009. Вып. 15. С. 199–203.
2. Качановский Ф.В. Кислотность атмосферных осадков, выпадающих в Твери (статистический анализ динамики) // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2012. Вып. 22. С. 82–87.
3. Качановский Ф.В. Связь кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери, с температурой воздуха // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2013. Вып. 2 (24). С. 28–31.
4. Качановский Ф.В. Связь кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери, с их количеством // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 1 (27). С. 34–39.
5. Качановский Ф.В. Эволюция тренда и внутригодовой динамики кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 2 (30). С. 83–87.
6. Качановский Ф.В. Изменение оценок кислотности осадков, выпадающих в Твери, в результате удлинения ряда // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 2 (32). С. 93–96.
7. Качановский Ф.В. Что происходит с кислотностью осадков, выпадающих в Твери? // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 2 (34). С. 90–94.

8. Качановский Ф.В. Характер динамики кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Строительство и землеустройство: проблемы и перспективы развития: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 59–65.
9. Качановский Ф.В. О кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 66–74.
10. Качановский Ф.В. Поведение кислотности осадков, выпавших в Твери в 1990–2020 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 105–113.
11. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 1998. 528 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КАЧАНОВСКИЙ Феликс Вячеславович – доцент кафедры гидравлики, теплотехники и гидропривода, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качановский Ф.В. Статистический анализ удлиняющегося ряда наблюдений за кислотностью осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 79–88.

STATISTICAL ANALYSIS OF OBSERVATIONS THE PRECIPITATIONS ACIDITY IN TVER

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of dynamics of the precipitation acidity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 1990–2022 years). Time series models of the indicator pH and her evolution were examined. Qubic model have considered as adequate. Trend, cyclic component and seasonal indices of the indicator pH preserved his character in spite of time series lengthening.

Keywords: acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cyclic component, seasonal component, residuals, indicator pH .

REFERENCES

1. Kachanovsky F.V. The dynamics of the acidity of precipitation in Tver (statistical analysis). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2009. Iss. 15, pp. 199–203. (In Russian).
2. Kachanovsky F.V. Acidity of atmospheric precipitation in Tver (statistical analysis of dynamics). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2012. Iss. 22, pp. 82–87. (In Russian).

3. Kachanovsky F.V. Relationship between the acidity of precipitation in Tver and air temperature. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2013. Iss. 2 (24), pp. 28–31. (In Russian).
4. Kachanovsky F.V. Relationship between the acidity of precipitation in Tver and their amount. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2015. Iss. 1 (27), pp. 34–39. (In Russian).
5. Kachanovsky F.V. Evolution of the trend and intra-annual dynamics of the acidity of precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2016. Iss. 2 (30), pp. 83–87. (In Russian).
6. Kachanovsky F.V. Changes in the estimates of the acidity of precipitation in Tver as a result of lengthening the series. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2017. Iss. 2 (32), pp. 93–96. (In Russian).
7. Kachanovsky F.V. What happens to the acidity of precipitation in Tver? *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2018. Iss. 2 (34), pp. 90–94. (In Russian).
8. Kachanovsky F.V. The nature of the dynamics of the acidity of precipitation falling in Tver. *Construction and Land Management: Problems and Development Prospects: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Tver: TvGTU, 2019, pp. 59–65. (In Russian).
9. Kachanovsky F.V. On the acidity of precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himičeskie tehnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 66–75. (In Russian).
10. Kachanovsky F.V. Behaviour of the precipitations acidity in Tver, 1990–2020 years. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himičeskie tehnologii»*. 2021. No. 3 (11), pp. 105–113. (In Russian).
11. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere* [Statistical analysis of data on a computer]. Moscow: INFRA-M, 1998. 528 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich – associate professor of the department of hydraulics, heat engineering and hydraulic drive, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Statistical analysis of observations the precipitations acidity in Tver // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 1 (17), pp. 79–88.