

СТАТЬЯ

УДК 556.531.4:519.246.8
DOI 10.17513/use.38540



CC BY 4.0

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАЧЕСТВА ВОДЫ РЕКИ МОСКВЫ: ОТ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ДАННЫХ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ

Никитин М. В. ORCID ID 0009-0009-1355-8402,

Розенталь О. М. ORCID ID 0000-0001-6261-6060

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт водных проблем Российской академии наук»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: nikitin.mv2000@gmail.com*

Прогнозирование качества воды рек в условиях интенсивной урбанизации является актуальной задачей для обеспечения устойчивого водопользования, однако для р. Москвы подобные исследования на основе анализа временных рядов ранее не проводились. Целью работы является выявление закономерностей пространственно-временной изменчивости гидрохимических показателей р. Москвы и обоснование возможности их статистического прогнозирования. Исследование выполнено на основе данных мониторинга 2018–2023 гг. для 10 створов по 5 показателям: консервативные ионы (Cl^- , SO_4^{2-}), биохимически активные соединения азота (NH_4^+ , NO_3^-) и нефтепродукты. Применен комплексный статистический подход, включающий критерий отношения среднего скользящего размаха к стандартному отклонению для оценки случайности временных рядов, корреляционный анализ Спирмена, метод нормированного размаха для определения персистентности, а также авторегрессионные модели со скользящим средним и метод Холта – Уинтерса для прогнозирования. Установлено, что изменения всех исследованных показателей носят неслучайный характер, что создает теоретическую основу для статистического прогнозирования. Выявлена выраженная пространственная неоднородность наследования гидрохимических характеристик вдоль русла: максимальные коэффициенты корреляции зафиксированы в верхнем течении (0,78–0,91) и на участках стабилизации ниже города (0,83–0,95), тогда как критические нарушения наследования приурочены к зонам интенсивного антропогенного воздействия и смешения вод различного генезиса. Показатели Херста (0,62–0,95) подтверждают персистентность рядов и наличие долговременной памяти. Метод Холта – Уинтерса обеспечил наилучшее качество прогнозов для консервативных ионов. Определены горизонты прогнозирования и участки приоритетного контроля, что позволяет оптимизировать систему мониторинга и обеспечить научное обоснование мер по устойчивому управлению водными ресурсами в урбанизированных условиях. Полученные результаты создают научную основу для оптимизации системы мониторинга и устойчивого управления водными ресурсами р. Москвы в урбанизированных условиях.

Ключевые слова: гидрохимия, прогнозирование, персистентность, Москва-река, качество воды, временные ряды, мониторинг

SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF WATER QUALITY IN THE MOSKVA RIVER: FROM DATA STRUCTURE ANALYSIS TO FORECASTING

Nikitin M. V. ORCID ID 0009-0009-1355-8402,

Rozental O. M. ORCID ID 0000-0001-6261-6060

*Federal State Budgetary Institution of Science
“Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences”,
Moscow, Russian Federation, e-mail: nikitin.mv2000@gmail.com*

Forecasting river water quality under intensive urbanization is essential for sustainable water management; however, no time series-based forecasting studies have previously been conducted for the Moskva River. The aim of this work is to identify spatiotemporal variability patterns of the Moskva River hydrochemical parameters and to substantiate the feasibility of their statistical forecasting. Monitoring data collected during 2018–2023 at 10 gauging stations for five parameters: conservative ions (Cl^- , SO_4^{2-}), biochemically active nitrogen compounds (NH_4^+ , NO_3^-), and petroleum products were analyzed. A comprehensive statistical approach was applied, including the ratio of average moving range to standard deviation (AMR/SD) to assess time series randomness, Spearman rank correlation analysis, rescaled range (R/S) analysis to determine persistence, and autoregressive moving average models and Holt–Winters models for forecasting. All examined parameters exhibited non-random behavior, providing a theoretical basis for statistical forecasting. A pronounced spatial heterogeneity in the inheritance of hydrochemical characteristics along the river was identified: maximum correlation coefficients were recorded in the upper reaches (0.78–0.91) and in stabilization zones downstream of the city (0.83–0.95), whereas critical disruptions were confined to zones of intense anthropogenic impact and mixing of waters of different origin. Hurst exponents (0.62–0.95) confirmed time series persistence and long-term memory. The Holt–Winters method provided the best forecast quality for conservative ions. Forecasting horizons and priority monitoring reaches were determined, providing a scientific basis for optimizing the monitoring system and sustainable water resource management of the Moskva River under urbanized conditions.

Keywords: water quality, forecasting, persistence, hydrochemistry, monitoring, time series, Moskva River

Введение

Река Москва, являясь главной водной артерией столичного мегаполиса с населением более 13 млн чел., испытывает интенсивную и разнообразную антропогенную нагрузку на всем протяжении своего течения [1, 2]. Трансформация качества речных вод под влиянием урбанизации представляет собой сложный процесс, определяемый взаимодействием естественных гидрологических циклов, биогеохимических процессов самоочищения и множественных источников загрязнения – как точечных (городские очистные сооружения, промышленные предприятия), так и диффузных (поверхностный сток с урбанизированных территорий, атмосферные выпадения) [3–5].

Существующие подходы к мониторингу качества речных вод на урбанизированных территориях преимущественно сводятся к сравнению измеренных концентраций с нормативными значениями¹ [6, 7] и не позволяют своевременно выявлять негативные тенденции и принимать превентивные меры по предотвращению ухудшения качества воды. Между тем разработка методов прогнозирования гидрохимических показателей остается актуальной задачей для водопользования в условиях крупных городских агломераций [8, 9].

Ключевым условием прогнозирования является наличие в структуре временных рядов детерминированных компонент – трендов, сезонных циклов, автокорреляционных зависимостей [10, 11]. Временные ряды качества речных вод формируются под воздействием регулярных факторов (сезонная динамика гидрологического режима, годовые циклы хозяйственной деятельности) и нерегулярных (аварийные сбросы, экстремальные гидрометеорологические события) [12, 13]. Предшествующие исследования показали, что такие ряды часто характеризуются персистентностью – склонностью сохранять направление изменения на определенных временных масштабах [14–16]. Это свойство, количественно оцениваемое показателем Херста, указывает на возможность статистического прогнозирования [14, 17]. Однако его выраженность существенно зависит от характера водосбора и интенсивности антропогенного воздействия [15, 18], что особенно важно для рек урбанизированных территорий [8, 9].

Специфика р. Москвы определяется резкой контрастностью условий формирования

качества воды на различных участках русла, обусловленной градиентом антропогенной нагрузки и сложным характером взаимодействия поверхностных и подземных вод [3, 19, 20]. Русло охватывает территории от относительно естественных ландшафтов верховий до зоны максимальной антропогенной нагрузки в черте мегаполиса [3–5] и участков частичного восстановления в среднем и нижнем течении. Такая пространственная неоднородность позволяет исследовать влияние урбанизации на статистическую структуру временных рядов и, соответственно, на возможность их прогнозирования [7, 8, 21].

Задача прогнозирования осложняется не только антропогенным воздействием, но и влиянием подземных источников питания, формирующих дополнительную неопределенность в динамике показателей. Несмотря на значительное число работ по мониторингу качества воды р. Москвы [1, 4, 20], исследования, направленные на статистическое прогнозирование гидрохимических показателей на основе анализа временных рядов, в доступной литературе не представлены.

Цель исследования – выявление закономерностей пространственно-временной изменчивости гидрохимических показателей р. Москвы на основе комплексного статистического анализа временных рядов и обоснование возможности их прогнозирования для оптимизации системы мониторинга качества воды в урбанизированных условиях.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено на основе данных многолетнего гидрохимического мониторинга р. Москвы за период с 2018 по 2023 г. Выбор шестилетнего периода обусловлен необходимостью обеспечения достаточной длины временных рядов (72 ежемесячных наблюдения) для корректной идентификации сезонных паттернов и долгосрочных трендов, а также однородностью методологии отбора и анализа проб на протяжении данного периода.

Анализ проведен для 5 показателей, охватывающих различные типы веществ: консервативные ионы (Cl^- , SO_4^{2-}), биохимически активные соединения азота (NH_4^+ , NO_3^-) и нефтепродукты (*Urals*), для 10 створов наблюдения, расположенных вдоль русла реки от верхнего течения до устья: Звенигород-2 (M_1), д. Верхний Суян (M_2), Одиноково (M_3), Москва-1 (M_4), Москва-3 (M_5), д. Маяково-1 (M_6), д. Маяково-2 (M_7), Воскресенск-1 (M_8), Воскресенск-2 (M_9), Коломна-1 (M_{10}).

¹ РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2002.

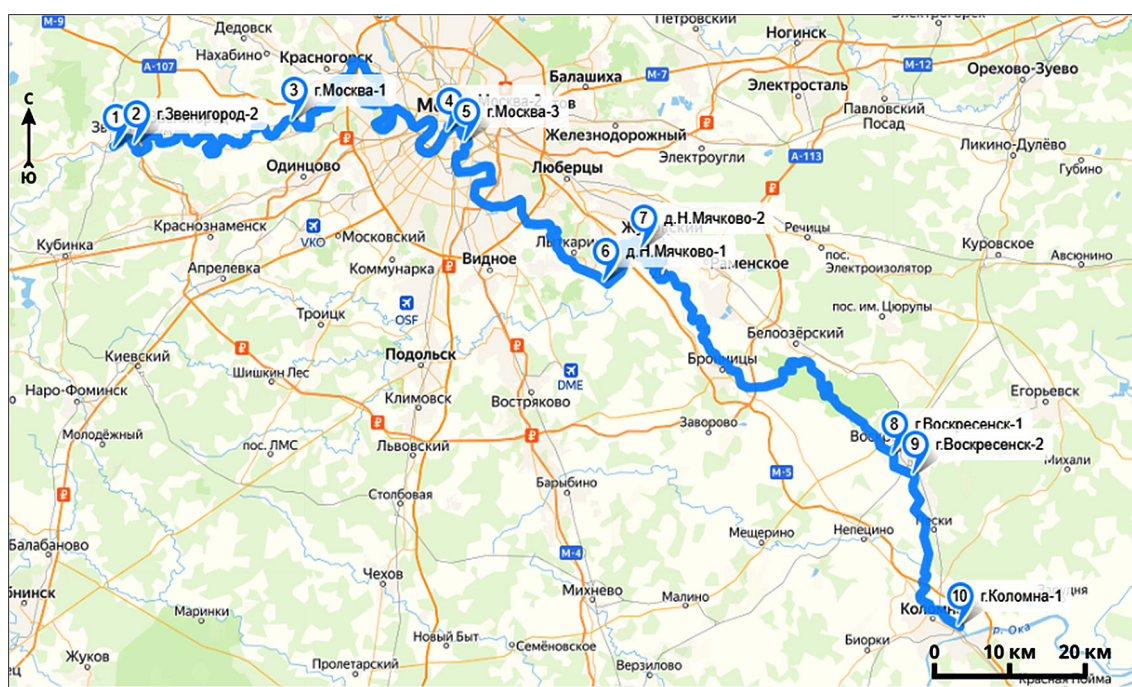


Рис. 1. Схема расположения створов на р. Москве

Примечание: составлен авторами на основе данных мониторинговой сети наблюдений

Выбор створов обусловлен необходимостью охвата градиента антропогенной нагрузки [3, 5]: от минимального воздействия в верхнем течении (M_1 – M_2 , район Звенигорода) через зону максимального техногенного влияния в черте Москвы (M_4 – M_5) к участкам разбавления и частичного самоочищения (M_6 – M_7) и нижнему течению с умеренной нагрузкой от локальных промышленных центров (M_8 – M_{10}). Более подробная схема расположения створов представлена на рис. 1.

Анализ проведен для пяти показателей, охватывающих различные типы веществ: консервативные ионы (Cl^- , SO_4^{2-}), биохимически активные соединения азота (NH_4^+ , NO_3^-) и нефтепродукты ($Urals$).

Для выявления закономерностей изменчивости качества воды применен комплекс статистических методов: критерий отношения среднего скользящего размаха к стандартному отклонению (AMR/SD) для оценки случайности временных рядов; ранговая корреляция Спирмена для количественной оценки наследования гидрохимических характеристик между створами; R/S-анализ для определения персистентности и глубины памяти; модели ARIMA/SARIMA и метод экспоненциального сглаживания Холта – Уинтерса для прогнозирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Метод (AMR/SD)

Применение критерия отношения среднего скользящего размаха к стандартному отклонению (AMR/SD) показало, что все исследованные гидрохимические показатели на створах р. Москвы демонстрируют статистически значимое отклонение от референтного значения 1,128, характерного для случайного процесса [22, 23]. Для случайного нормально распределенного процесса AMR/SD стремится к 1,128 [22, 23]; систематическое отклонение вниз свидетельствует о наличии автокорреляции и детерминированных компонент. Следует отметить, что референтное значение выведено в предположении нормальности, тогда как гидрохимические ряды характеризуются выраженной правосторонней асимметрией (до 4,27) и эксцессом (до 25,36), что может влиять на точность порогового значения. Тем не менее направление отклонения (AMR/SD заметно ниже 1,128 на всех створах) однозначно указывает на неслучайный характер рядов. Средние значения AMR/SD для всех пяти показателей укладываются в узкий диапазон 0,70–0,77 (отклонение от случайности 32–38 %). Близость средних значений указывает на общность механизмов формирования

неслучайной структуры данных, хотя консервативные ионы обнаруживают несколько большую степень детерминированности.

Результаты применения критерия отношения среднего скользящего размаха к стандартному отклонению (AMR/SD) для р. Москвы представлены на рис. 2.

Пространственное распределение значений AMR/SD вдоль русла различается для разных групп веществ. Значения для хлоридных ионов последовательно снижаются от верхнего течения (0,83–0,87 на створах M_1 – M_4) к нижнему (0,63–0,71 на створах M_7 – M_{10}): степень детерминированности временных рядов возрастает вниз по течению. Минимум 0,63 на створе M_{10} говорит о максимальной выраженности регулярных компонент в устьевой части реки, где процессы смешения завершены и гидрохимический режим стабилизирован.

Сульфатные ионы характеризуются наиболее стабильными значениями AMR/SD (0,54–0,83) с минимальной пространственной вариабельностью. Среднее значение

0,70 – наименьшее среди всех показателей – закономерно для консервативных сульфатов, практически не участвующих в биохимических трансформациях и слабо подверженных сорбционным процессам [19, 24]. Минимальное значение 0,54 на створе M_4 в центральной части Москвы может объясняться регулярностью поступления сульфатов от промышленных источников и систем водоотведения.

Для аммонийного азота картина обратная: наименьшие значения AMR/SD отмечены в верхнем течении (0,62–0,63 на створах M_2 и M_4), наибольшие – в среднем и нижнем (0,87–0,93 на створах M_6 , M_8 , M_{10}). По мере движения водной массы по руслу стохастические факторы усиливают свое влияние, поскольку интенсивность нитрификации зависит от множества нерегулярных условий: температуры, содержания растворенного кислорода, активности микробиоценоза [5, 24]. Максимум 0,93 на створе M_8 соответствует наибольшей непредсказуемости динамики аммонийного азота в районе Воскресенска.

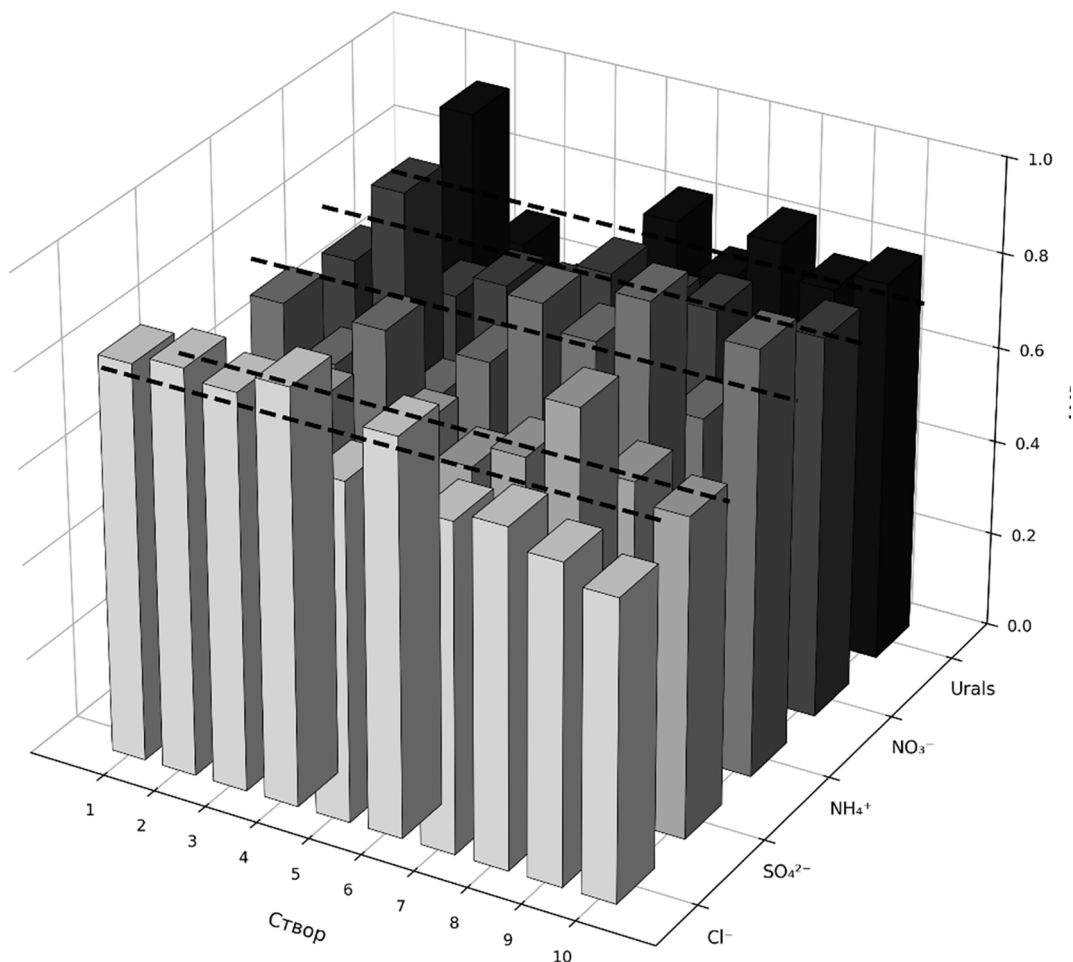


Рис. 2. Значения критерия AMR/SD для гидрохимических показателей на створах р. Москвы
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена
концентраций загрязняющих веществ на р. Москве

Вещество	M ₁ –M ₂	M ₂ –M ₃	M ₃ –M ₄	M ₄ –M ₅	M ₅ –M ₆	M ₆ –M ₇	M ₇ –M ₈	M ₈ –M ₉	M ₉ –M ₁₀
Cl ⁻	0,853	-0,035	0,271	0,650	0,049	0,910	0,706	0,926	0,831
SO ₄ ²⁻	0,777	0,034	0,193	0,576	0,025	0,867	0,540	0,926	0,646
NH ₄ ⁺	0,799	-0,255	0,297	0,112	0,200	0,860	0,527	0,946	0,775
NO ₃ ⁻	0,913	-0,144	0,508	0,490	-0,052	0,836	0,485	0,833	0,872
Urals	0,820	0,009	0,208	0,381	0,178	0,894	0,293	0,721	0,566

Примечание: составлена авторами на основе данных, полученных в ходе исследования.

Нефтепродукты показывают промежуточные значения AMR/SD (0,60–0,94) с максимумом на створе M2 (0,94), приближающимся к границе случайного процесса. Вероятная причина – эпизодический характер поступления нефтепродуктов от локальных источников в районе верхнего течения. В центральной части (M₄–M₅) значения падают до 0,60–0,61 – загрязнение от множества урбанистических источников носит более регулярный характер.

Таким образом, совокупность полученных данных подтверждает наличие детерминированной структуры временных рядов всех исследованных показателей – выраженные тренды, автокорреляция и периодические компоненты формируют теоретическую основу для прогнозирования качества воды.

Корреляционный анализ

Для количественной оценки связи между створами применен непараметрический метод статистического изучения связи – ранговая корреляция Спирмена. Результаты представлены в табл. 1.

Результаты корреляционного анализа выявили выраженную пространственную неоднородность наследования гидрохимических характеристик вдоль русла р. Москвы [12]. Средние значения коэффициентов корреляции Спирмена варьируют от 0,452 для нефтепродуктов до 0,574 для хлоридных ионов – степень наследования для большинства показателей умеренная. Однако усредненные значения маскируют принципиально важную закономерность: чередование участков с высоким и низким наследованием, определяемое характером антропогенного воздействия.

На участке верхнего течения M₁–M₂ (район Звенигорода) все коэффициенты корреляции максимальны (0,777–0,913; табл. 1), что отражает сохранение временной струк-

туры данных при минимальном антропогенном воздействии.

Критическое нарушение наследования происходит на участке M₂–M₃ (Звенигород – Одинцово), где коэффициенты корреляции приближаются к нулю или становятся отрицательными: от -0,255 для аммонийного азота до 0,034 для сульфатных ионов. Такой перелом свидетельствует о существенной трансформации гидрохимических характеристик при подходе к урбанизированной зоне Московской агломерации [3]. Отрицательный коэффициент для аммонийного азота (-0,255) особенно показателен и может объясняться сменой доминирующего источника: от естественного фона в верхнем течении к антропогенному поступлению с противофазным сезонным режимом в пригородной зоне.

В черте Москвы (участки M₃–M₄ и M₄–M₅) корреляционные связи частично восстанавливаются, но на более низком уровне (0,11–0,65). Наибольшую степень наследования сохраняют хлоридные ионы (0,65 между M₄–M₅) благодаря их консервативным свойствам. Корреляция для аммонийного азота минимальна (0,112 между M₄–M₅) – сказывается интенсивность биохимических трансформаций в условиях городского загрязнения.

На участке M₅–M₆ при выходе из Москвы вновь отмечается практически полная потеря корреляционных связей (коэффициенты от -0,052 до 0,200). Эта зона представляет собой переходный участок, где смешиваются воды различного генезиса: речной сток, сбросы очистных сооружений, притоки малых рек [1, 3]. Стохастичность процессов смешения приводит к разрушению временной структуры данных.

Между створами M₆–M₇ (район д. Маяково) корреляция резко восстанавливается до максимальных значений (0,836–0,910;

табл. 1): гидрохимические процессы стабилизируются после прохождения зоны интенсивного антропогенного воздействия.

В нижнем течении (M_7 – M_{10}) сохраняются устойчиво высокие коэффициенты (0,485–0,946; табл. 1), с максимумом на участке M_8 – M_9 и некоторым снижением к M_9 – M_{10} (0,566–0,872), вероятно, из-за локальных источников загрязнения в районе Коломны.

Иерархия показателей по степени наследования отражает их физико-химические свойства: консервативные ионы характеризуются наибольшим средним коэффициентом корреляции (0,574 для хлоридных, 0,509 для сульфатных ионов), нитратный азот занимает промежуточное положение (0,527), аммонийный азот – 0,473, а нефтепродукты демонстрируют наименьшее значение (0,452) вследствие биохимических трансформаций и неравномерности поступления.

*Описательная статистика
и распределение приоритетных
загрязнителей*

Для трех приоритетных загрязнителей (NH_4^+ , NO_3^- и нефтепродукты) на пяти репрезентативных створах (M_1 , M_3 , M_5 , M_7 , M_{10}) рассчитаны основные показатели. Результаты представлены в табл. 2.

Из 10 створов, охваченных мониторингом, для детального анализа описательной статистики в табл. 2 выбраны 5 репрезентативных створов (M_1 , M_3 , M_5 , M_7 , M_{10}),

отражающих ключевые зоны формирования качества воды. Анализ описательной статистики приоритетных загрязнителей на репрезентативных створах выявил закономерное увеличение средних концентраций по мере приближения к урбанизированной территории с последующей частичной стабилизацией или снижением в нижнем течении. Средняя концентрация аммонийного азота возрастает от 0,21 мг/л на створе M_1 до 3,21 мг/л на створе M_7 – 15-кратный рост под влиянием городского загрязнения. На створе M_{10} наблюдается снижение до 2,17 мг/л, отражающее процессы самоочищения в нижнем течении.

Содержание нитратного азота меняется сходным образом – от 1,05 мг/л в верховьях до 4,63 мг/л на створе M_{10} в устьевой части реки. Нефтепродукты характеризуются пиком концентрации на створе M_5 в центре Москвы (0,20 мг/л) с последующим снижением до 0,08–0,10 мг/л в нижнем течении вследствие процессов биodeградации.

Коэффициент вариации (CV) отражает относительную изменчивость показателей и варьирует от 0,51 до 1,09. Наибольшая вариабельность характерна для нефтепродуктов на створе M_5 (CV = 1,09) вследствие эпизодического характера техногенных поступлений. Относительно стабильными являются концентрации нитратного азота на всех створах (CV = 0,51–0,78), что связано с ролью биогеохимического цикла азота.

Таблица 2

Статистические характеристики временных рядов
приоритетных загрязнителей на репрезентативных створах р. Москвы

Критерий	Створы														
	M_1			M_3			M_5			M_7			M_{10}		
Вещество	NH_4^+	NO_3^-	Urals	NH_4^+	NO_3^-	Urals	NH_4^+	NO_3^-	Urals	NH_4^+	NO_3^-	Urals	NH_4^+	NO_3^-	Urals
μ (среднее)	0,21	1,05	0,03	0,23	1,04	0,04	2,71	3,40	0,20	3,21	4,07	0,10	2,17	4,63	0,08
σ (ст. откл)	0,17	0,82	0,02	0,16	0,74	0,02	1,62	1,96	0,22	1,83	2,33	0,06	1,70	2,35	0,05
CV	0,85	0,78	0,56	0,72	0,71	0,63	0,60	0,58	1,09	0,57	0,57	0,58	0,78	0,51	0,59
S (асимметрия)	2,02	2,92	2,01	1,28	1,52	2,34	0,60	1,38	4,27	0,89	2,24	2,44	0,70	0,49	2,55
K (эксцесс)	4,68	14,28	5,90	2,28	3,92	7,59	0,50	5,76	25,36	0,81	11,47	7,74	-0,49	2,63	8,87
Min	0,02	0,05	0,01	0,01	0,03	0,01	0,10	0,05	0,03	0,55	0,11	0,04	0,03	0,05	0,03
Max	0,88	5,86	0,10	1,01	4,37	0,16	8,82	14,86	2,01	8,88	17,08	0,35	6,60	13,56	0,33
ACF ₁	0,21	0,32	0,24	0,28	0,29	0,35	0,49	0,35	0,03	0,54	0,32	0,19	0,60	0,59	0,17
H (Херст)	0,78	0,92	0,72	0,75	0,92	0,73	0,82	0,90	0,65	0,83	0,83	0,72	0,88	0,95	0,62
β (спектр)	0,43	0,51	0,02	0,47	0,28	0,37	0,45	0,35	0,01	0,86	0,47	0,26	1,03	1,15	0,46
Тип шума	Б	Р	Б	Б	Б	Б	Б	Б	Б	Р	Б	Б	Р	Р	Б

Примечание: составлена авторами на основе данных, полученных в ходе исследования. Б – белый шум, Р – розовый шум.

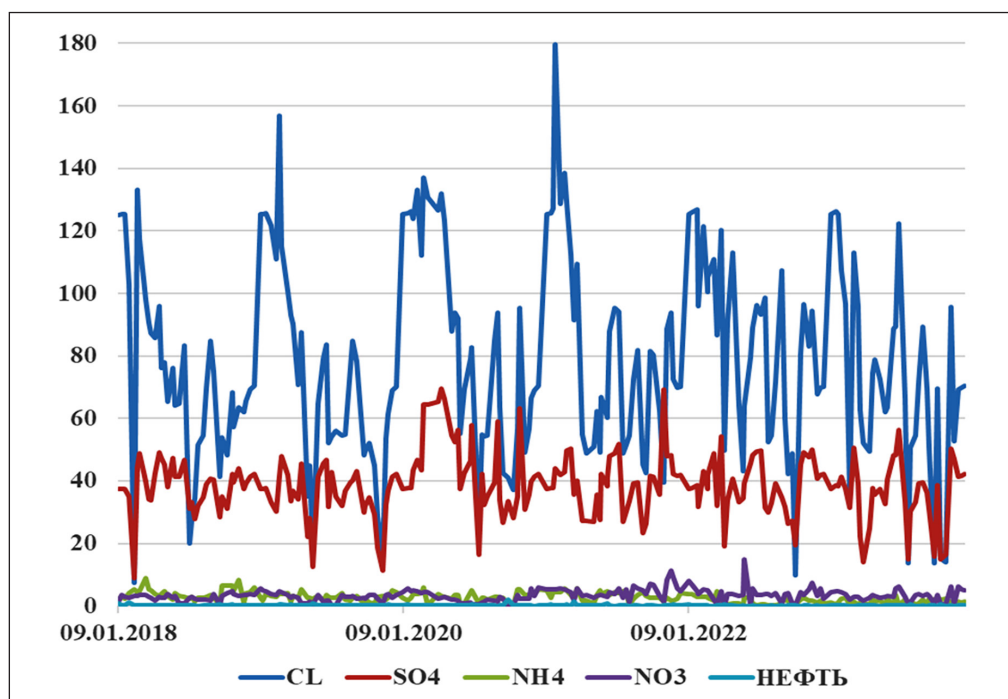


Рис. 3. Движение исходного ряда загрязнителей на створе M_5
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Все распределения характеризуются положительной асимметрией ($S = 0,49-4,27$) и повышенным эксцессом, что типично для концентраций загрязняющих веществ [11, 13]. Максимальный эксцесс ($K = 25,36$) отмечен для нефтепродуктов на створе M_5 (рис. 3), повышенные значения характерны и для нитратного азота ($K = 14,28$ на M_1 ; $K = 11,47$ на M_7). Отклонение от нормальности не ограничивает применимость моделей ARIMA/SARIMA: оценки параметров методом максимального правдоподобия остаются состоятельными при ненормальных остатках [10], однако доверительные интервалы прогнозов расширяются.

Автокорреляционная функция первого порядка (ACF1) характеризует краткосрочную память временных рядов. Значения варьируют от минимальных 0,03 для нефтепродуктов на створе M_5 до максимальных 0,60 для аммонийного азота на створе M_{10} . Закономерно, что наибольшая краткосрочная автокорреляция приходится на показатели с выраженной сезонной динамикой в условиях стабилизированного гидрохимического режима нижнего течения.

Показатель Херста (H), характеризующий долгосрочную персистентность временных рядов, находится в диапазоне 0,62–0,95. Все значения превышают 0,5, то есть процессы носят трендовый характер [15–17]. Вместе с тем при длине ряда $N = 72$ оценки

H могут быть смещены в сторону завышения [15, 18] и носят индикативный характер. Максимальные значения H отмечены для аммонийного азота на створах M_5 , M_7 и M_{10} – именно здесь долговременная память выражена сильнее всего. Нефтепродукты характеризуются минимальными значениями H (0,62–0,73 на нижних створах), приближающимися к границе случайного блуждания.

Спектральный показатель β позволяет классифицировать ряды: $\beta < 0,5$ – белый шум, $0,5 < \beta < 1,5$ – розовый шум [17, 18]. Розовый шум характерен преимущественно для нижнего течения: аммонийный азот переходит от белого шума в верхнем и среднем течении (M_1 , M_3 , M_5) к розовому на створах M_7 и M_{10} ($\beta = 0,86$ и $1,03$ соответственно), нитратный азот переходит к розовому шуму только на створах M_1 ($\beta = 0,51$) и M_{10} ($\beta = 1,15$), тогда как на промежуточных створах M_3 , M_5 и M_7 остается в зоне белого шума. Нефтепродукты на всех исследованных створах относятся к белому шуму ($\beta = 0,01-0,46$): стохастические процессы преобладают в их динамике независимо от положения на русле. Вместе с тем для ряда показателей наблюдается расхождение между H и β : например, для нитратного азота на створе M_1 при $H = 0,92$ ожидаемое $\beta = 2H - 1 = 0,84$, тогда как фактическое $\beta = 0,51$. Причины – статистическая неопределенность оценок при коротких

рядах ($N = 72$), завышение H методом R/S [15, 18] и наличие нелинейных зависимостей, не улавливаемых спектральным анализом [17]. Глубина памяти (τ), определенная по затуханию ACF до незначимого уровня, варьирует от 4 до 12 временных единиц (месяцев) [10, 15]. Максимальная память $\tau = 12$ отмечена для аммонийного азота на створе M_7 , минимальная $\tau = 4$ – для ряда показателей в верхнем течении и для нефтепродуктов. Иначе говоря, прогноз аммонийного азота в нижнем течении потенциально может опираться на информацию за последний год наблюдений, тогда как для нефтепродуктов горизонт памяти ограничен четырьмя месяцами.

Прогнозирование ARIMA/SARIMA

Для каждого показателя на всех створах идентифицированы оптимальные модели по критерию минимума AIC [10]. Модели ARIMA низкого порядка – преимущественно (1, 1, 1) и (2, 1, 1) – оказались оптимальными для большинства комбинаций «створ – показатель». Основная динамика временных рядов, таким образом, определяется авторегрессионной компонентой первого-второго порядка с дифференцированием для достижения стационарности.

Сезонные модели SARIMA показали неоднозначные результаты. Анализ 50 комбинаций «створ – показатель» показал, что учет сезонности оправдан лишь в 30 % случаев – преимущественно для нитратного азота в нижнем течении (M_9-M_{10}), где улучшение прогноза достигает +64,6 % по RMSE. В большинстве случаев сезонные модели ухудшают прогноз: при малом числе полных циклов (6 лет) сезонные параметры подстраиваются под случайные особенности обучающей выборки, и RMSE возрастает в 2,5–20 раз, особенно для консервативных ионов на верхних створах, где сезонный сигнал маскируется устойчивым фоновым уровнем. Годовая сезонность ($S = 12$) характерна для консервативных ионов, для биогенных элементов – более короткая ($S = 2-6$) [13].

Пространственная дифференциация качества моделей подчиняется общей закономерности: наилучшие результаты достигаются в нижнем течении (M_8-M_{10}), где RMSE для аммонийного азота составляет 0,9–1,0 мг/л, для нитратного азота – 1,3–3,6 мг/л, для нефтепродуктов – менее 0,1 мг/л. В центральной части (M_4-M_5) ошибки прогноза возрастают, особенно для нефтепродуктов (RMSE до 0,2 мг/л на створе M_5), поскольку поступление загрязнений от множественных городских источников

носит выраженный стохастический характер. Наилучшая относительная прогнозируемость получена для аммонийного азота: RMSE составляет 0,1–1,4 мг/л при средних концентрациях 0,2–3,2 мг/л (относительная ошибка 30–50 %).

Метод Холта – Уинтерса

Метод Холта – Уинтерса применялся в варианте с аддитивной сезонностью и аддитивным трендом. Параметры сглаживания (α , β^* , γ) оптимизировались по критерию минимума суммы квадратов остатков с использованием библиотеки statsmodels (Python). Метод обеспечил улучшение качества прогнозирования по сравнению с ARIMA/SARIMA для большинства показателей за счет адаптивного взвешивания последних наблюдений.

В верхнем течении (створы M_1-M_2), где корреляционный анализ выявил максимальные коэффициенты наследования (0,78–0,91), метод обеспечивает высокое качество прогноза: для хлоридных ионов RMSE составляет 4,6–12,5 мг/л, для сульфатных – 3,2–8,0 мг/л, для нефтепродуктов – 0,01–0,02 мг/л. Это существенно ниже, чем для моделей ARIMA, особенно для консервативных ионов.

В черте Москвы (створы M_3-M_5) качество прогноза остается стабильным, что согласуется с частичным восстановлением корреляционных связей на данном участке. Для хлоридных ионов RMSE составляет 5,9–12,5 мг/л, для аммонийного азота – 0,09–0,89 мг/л, для нитратного – 0,41–1,05 мг/л. Нефтепродукты на створе M_5 характеризуются повышенной ошибкой (RMSE = 0,11 мг/л) вследствие высокой вариабельности исходного ряда.

В нижнем течении (створы M_6-M_{10}) качество прогноза меняется нелинейно. Для хлоридных ионов RMSE увеличивается от 17,5 мг/л на M_6 до 19,0 мг/л на M_9 , затем резко снижается до 0,05 мг/л на M_{10} . Такая нелинейная зависимость связана с завершением процессов смешения и стабилизацией гидрохимического режима в устьевой зоне, где коэффициенты корреляции M_9-M_{10} достигают 0,57–0,87.

Аномально низкое значение RMSE для хлоридных ионов на створе M_{10} (0,05 мг/л, относительная ошибка менее 0,5 %) может объясняться квазистационарными условиями устьевой части под влиянием р. Оки. Данные были разделены на обучающую (2018–2022 гг., 60 наблюдений) и тестовую (2023 г., 12 наблюдений) выборки, столь высокая точность требует верификации на более длительном горизонте.

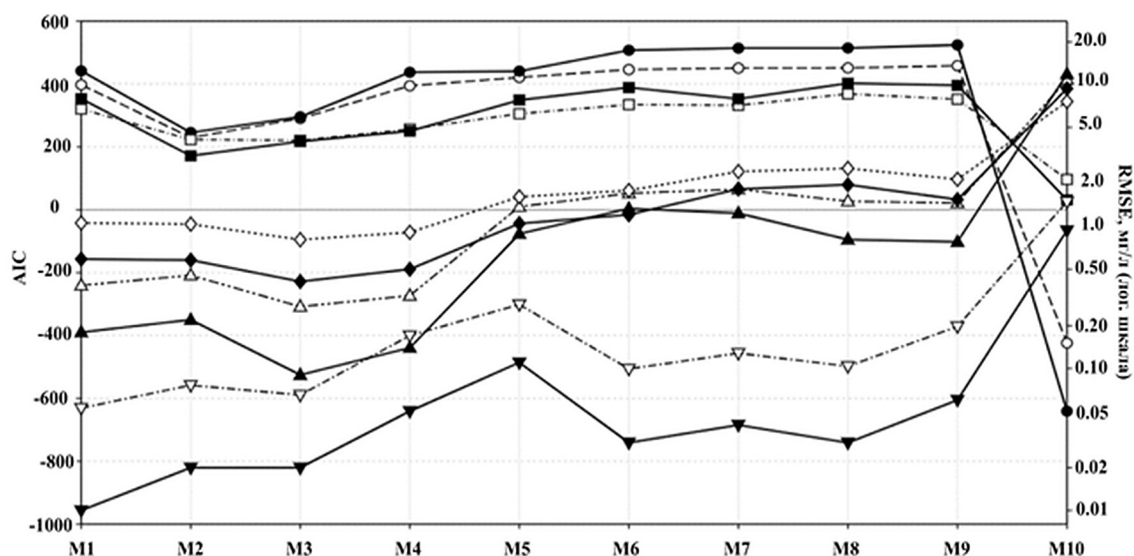


Рис. 4. Значения AIC и RMSE моделей метода Холта – Уинтерса для прогнозирования гидрохимических показателей р. Москвы. Горизонтальная серая линия соответствует нулевому значению AIC. Левая ось (пунктирные линии) – AIC (линейная шкала); правая ось (сплошные линии) – RMSE, мг/л (логарифмическая шкала). Круги – Cl^- , квадраты – SO_4^{2-} , направленные вверх треугольники – NH_4^+ , ромбы – NO_3^- , направленные вниз треугольники – *Urals*
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для биогенных элементов метод Холта – Уинтерса обеспечивает устойчивые результаты на всем протяжении реки. Для аммонийного азота RMSE составляет 0,09–1,34 мг/л, для нитратного – 0,41–1,97 мг/л. Эти значения соответствуют относительной ошибке 20–50 % в зависимости от створа, что приемлемо для целей оперативного прогнозирования.

Абсолютные ошибки для нефтепродуктов минимальны (RMSE = 0,01–0,11 мг/л). Однако при фоновых концентрациях 0,03–0,20 мг/л относительная погрешность может достигать 50–100 %. Наибольшая точность прогноза достигается в верхнем течении (M_1 – M_3), где RMSE не превышает 0,02 мг/л. Подробные результаты представлены на рис. 4.

Прогнозируемость временных рядов определяется совокупностью факторов: степенью наследования между створами, глубиной памяти, типом шума и стабильностью сезонных паттернов.

Заключение

Ограничения исследования. Длина временных рядов (72 ежемесячных наблюдения за 6 лет) накладывает ограничения на надежность ряда примененных методов. Оценки показателя Херста методом R/S при столь коротких рядах могут быть смещены в сторону завышения, а сезонные модели SARIMA с периодом $S=12$ распо-

лагают лишь шестью полными циклами для идентификации параметров. Описательная статистика приоритетных загрязнителей представлена для 5 из 10 створов; экстраполяция выводов на промежуточные створы требует осторожности. Прогностические модели валидировались на данных одного года (2023 г.), что не позволяет полностью исключить влияние специфических условий этого периода на оценку качества прогнозов. Для перекрестной верификации оценок персистентности целесообразно привлечение альтернативных методов (DFA, вейвлет-анализ) при накоплении более длительных рядов наблюдений. Проведенное исследование позволило установить ключевые закономерности пространственно-временной изменчивости качества воды р. Москвы и обосновать возможности статистического прогнозирования гидрохимических показателей как инструмента устойчивого водопользования.

Критерий AMR/SD подтвердил неслучайный характер изменений всех исследованных показателей (AMR/SD = 0,70–0,77) и тем самым обосновал возможность статистического прогнозирования. Показатели Херста в диапазоне 0,62–0,95 указывают на персистентность временных рядов, а глубина памяти $\tau = 4$ –12 месяцев определяет практический горизонт, в пределах которого

историческая информация сохраняет прогностическую ценность.

Корреляционный анализ выявил выраженную пространственную дифференциацию наследования гидрохимических характеристик вдоль русла. Максимальные коэффициенты корреляции зафиксированы в верхнем течении (0,78–0,91 на участке M_1 – M_2) и в зоне стабилизации ниже города (0,83–0,95 на участках M_6 – M_7 и M_8 – M_9). Критические нарушения наследования приурочены к переходным зонам M_2 – M_3 и M_5 – M_6 , где коэффициенты корреляции приближаются к нулю или принимают отрицательные значения. В этих зонах происходит интенсивное смешение вод различного генезиса, включая подземные источники питания, и именно это обуславливает стохастичность гидрохимических процессов и невозможность прогнозирования на основе данных вышележащих створов.

Сравнительный анализ прогностических моделей показал, что метод Холта – Уинтерса обеспечивает наилучшее качество прогнозов для консервативных ионов и биогенных элементов (RMSE 0,05–19,0 мг/л для хлоридов, 0,09–1,34 мг/л для аммонийного азота), тогда как модели ARIMA предпочтительны для нефтепродуктов вследствие эпизодического характера их поступления.

На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по горизонтам прогнозирования. Краткосрочный прогноз (1–3 месяца) с относительной ошибкой 15–40 % может быть обеспечен для всех створов р. Москвы. Среднесрочный прогноз (3–6 месяцев) возможен для консервативных ионов на участках с высоким наследованием (M_1 – M_2 , M_6 – M_7 , M_8 – M_9), где коэффициенты корреляции превышают 0,70. Увеличение горизонта прогнозирования свыше 6 месяцев сопряжено с возрастанием неопределенности и требует регулярной переоценки параметров моделей по мере поступления новых данных мониторинга.

Оптимальная стратегия мониторинга включает базовые створы с высоким наследованием (M_1 , M_7 , M_9) для построения прогнозов и контрольные створы (M_3 , M_6) для верификации моделей. Для зон приоритетного контроля (M_2 – M_3 , M_5 – M_6) рекомендуется учащение отбора проб до одного раза в декаду в период весеннего половодья.

Список литературы

1. Соколов Д. И., Ерина О. Н., Терешина М. А., Чалов С. Р. Антропогенное воздействие на содержание органических веществ в Москве-реке // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению: сб. докл. междунар. науч. конф. памяти Ю. Б. Виноградова. СПб.: ООО «Издательство ВВМ», 2020. С. 771–776. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43310018> (дата обращения: 04.06.2026).
2. Sokolov D. I., Erina O. N., Tereshina M. A., Chalov S. R. Human impact on organic matter distribution in the Moskva River // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 163. Art. 05013. DOI: 10.1051/e3sconf/202016305013.
3. Shinkareva G., Erina O., Tereshina M., Sokolov D., Ly-chagin M., Kasimov N. Anthropogenic factors affecting the Moskva River water quality: levels and sources of nutrients and potentially toxic elements in Moscow metropolitan area // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45. Is. 6. P. 3113–3141. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-022-01393-8> (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.1007/s10653-022-01393-8.
4. Тимофеева Е. А., Караванова Е. И. Оценка экологического состояния Москвы-реки в районе Курьяновских очистных сооружений // Городские исследования и практика. 2018. Т. 3. № 3. С. 99–110. URL: <https://usp.hse.ru/article/view/10546> (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.17323/usp33201899-110.
5. Booth D. B., Roy A. H., Smith B., Capps K. A. Global perspectives on the urban stream syndrome // Freshwater Science. 2016. Vol. 35. Is. 1. P. 412–420. URL: https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/684940?_cf_chl_rt_tk=1Q5xUUIJG08ghOe6fQMokWlctn8KYcHjPwH-v_3eo-1786108521-1.0.1.1-HqY3xAeH5ENAhK_jUvmHbx-OFen_v7pHwzLPVeiBdDfk (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.1086/684940.
6. Moiseenko T., Dinu M., Bazova M., de Wit H. A. Long-Term Changes in the Water Chemistry of Arctic Lakes as a Response to Reduction of Air Pollution: Case Study in the Kola, Russia // Water, Air, & Soil Pollution. 2015. Vol. 226. Is. 4. Art. 98. DOI: 10.1007/s11270-015-2310-0.
7. Лямперт Н. А., Ничипорова И. П., Первышева О. А., Хорошевская В. О., Голубкина М. А., Лобченко Е. Е. Изменение качества поверхностных вод на территории Центрального федерального округа в 2016–2021 гг. // Успехи современного естествознания. 2024. № 2. С. 22–29. URL: <https://scinetnetwork.ru/articles/36726> (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.17513/use.38214.
8. Фашевская Т. Б., Словягина А. Н., Полянин В. О., Алгушаева А. В. Антропогенные изменения гидрохимического режима и качества воды городского водотока: на примере реки Лихоборки, Московский регион // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 2. С. 203–217. URL: https://journals.rcsi.science/0321-0596/article/view/134852/en_US (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.31857/S0321059623020074.
9. Katimon A., Shahid S., Mohsenipour M. Modeling water quality and hydrological variables using ARIMA: A case study of Johor River, Malaysia // Sustainable Water Resources Management. 2018. Vol. 4. Is. 4. P. 991–998. DOI: 10.1007/s40899-017-0202-8.
10. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2015. 712 p. ISBN 978-1-118-67502-1.
11. Shumway R. H., Stoffer D. S. Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples. 4th ed. Cham: Springer, 2017. XIII, 562 p. DOI: 10.1007/978-3-319-52452-8. ISBN 978-3-319-52451-1.
12. Dupas R., Abbott B. W., Minaudo C., Fovet O. Distribution of Landscape Units Within Catchments Influences Nutrient Export Dynamics // Frontiers in Environmental Science. 2019. Vol. 7. Art. 43. P. 1–8. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00043.
13. Rode M., Wade A. J., Cohen M. J., Hensley R. T., Bowes M. J., Kirchner J. W., Arhonditsis G. B., Jordan P., Kronvang B., Halliday S. J., Skeffington R. A., Rozemeijer J. C., Aubert A. H., Rinke K., Jomaa S. Sensors in the Stream: The High-Frequency Wave of the Present // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50. Is. 19. P. 10297–10307. DOI: 10.1021/acs.est.6b02155.

14. Hurst H. E. Long-term storage capacity of reservoirs // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. Vol. 116. P. 770–799. URL: <https://colab.ws/articles/10.1061%2FTACEAT.0006518> (дата обращения: 12.06.2026). DOI: 10.1061/TACEAT.0006518.
15. Koirala S. R., Gentry R. W., Perfect E., Mulholland P. J., Schwartz J. S. Hurst Analysis of Hydrologic and Water Quality Time Series // Journal of Hydrologic Engineering. 2011. Vol. 16. Is. 9. P. 717–724. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000357.
16. Markonis Y., Koutsoyiannis D. Scale-dependence of persistence in precipitation records // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6. Is. 4. P. 399–401. URL: https://www.nature.com/articles/nclimate2894?error=cookies_not_supported&code=2b1f070-5ddb-4fa2-8326-78408f5f252e (дата обращения: 12.06.2026). DOI: 10.1038/nclimate2894.
17. Mandelbrot B. B., Wallis J. R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence // Water Resources Research. 1969. Vol. 5. Is. 5. P. 967–988. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Robustness-of-the-rescaled-range-R-S-in-the-of-long-Mandelbrot-Wallis/409277c521d2ae5cc11c89f63f116023b5edfebd> (дата обращения: 12.06.2026). DOI: 10.1029/WR005i005p00967.
18. O'Connell P. E., Koutsoyiannis D., Lins H. F., Markonis Y., Montanari A., Cohn T. The Scientific Legacy of Harold Edwin Hurst (1880–1978) // Hydrological Sciences Journal. 2016. Vol. 61. Is. 9. P. 1571–1590. DOI: 10.1080/02626667.2015.1125998.
19. Lintern A., Webb J. A., Ryu D., Liu S., Bende-Michl U., Waters D., Leahy P., Wilson P., Western A. W. Key factors influencing differences in stream water quality across space // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. 2018. Vol. 5. Is. 1. e1260. URL: https://www.researchgate.net/publication/320591512_Key_factors_influencing_differences_in_stream_water_quality_across_space (дата обращения: 25.07.2026). DOI: 10.1002/wat2.1260.
20. Tereshina M., Erina O., Sokolov D., Efimova L., Kasimov N. Nutrient dynamics along the Moskva River under heavy pollution and limited self-purification capacity // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 163. Art. 05014. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/23/e3sconf_vc2020_05014/e3sconf_vc2020_05014.html (дата обращения: 25.07.2026). DOI: 10.1051/e3sconf/202016305014.
21. Черногаева Г. М., Жадановская Е. А., Журавлева Л. Р., Малеванов Ю. А. Загрязнение окружающей среды в регионах России в начале XXI века: коллективная монография / отв. ред. А. А. Тишков. М.: ООО «ПОЛИГРАФ-ПЛИОС». 2019. 232 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42478647> (дата обращения: 25.07.2026). ISBN 978-5-906644-48-0.
22. Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2019. 768 p. ISBN 978-1-119-39930-8.
23. Montgomery D. C., Runger G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 7th ed. Hoboken: Wiley. 2018. 720 p. [Электронный ресурс]. URL: https://books.google.ru/books/about/Applied_Statistics_and_Probability_for_E.html?id=XATlwAEACAAJ&redir_esc=y (дата обращения: 25.07.2026). ISBN 978-1-119-40036-3.
24. Корецкая А. С. Изменение климата в России. Методы оценки изменения климата // Вестник науки. 2024. Т. 2. № 6. С. 2135–2140. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67354934> (дата обращения: 25.07.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 Государственного задания ИВП РАН.

Financing: This work was carried out within the framework of topic No. FMWZ-2025-0002 of the State Assignment of the IWP RAS.