

Оригинальная статья

УДК 556.113.3:628.357.5

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-106-114>

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ МУТНОСТИ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМА ЕЕ ВОДООЧИСТКИ

О.М. Розенталь¹, А.Г. Самбурский²✉^{1,2} Институт водных проблем РАН; г. Москва, Российская Федерация¹ omro3@yandex.ru; ORCID0000-0001-6261-6060² alex-sambursky@yandex.ru; ORCID0009-0004-8051-1173

Аннотация. Цель исследований – разработка методики краткосрочного прогноза мутности природной воды для создания условий оперативного регулирования технологии ее коагуляционно-фильтрационной очистки. Качество природной воды отличается непостоянством, требующим оперативного регулирования режима водоочистки. Эффективным такое регулирование может быть при условии предвидения изменений гидрохимического состава сырой жидкости, требующего анализа и прогноза. Мутность воды определялась при поступлении на водоканалы городов Ангарск, Уссурийск и Хабаровск. В работе использованы автокорреляционный анализ и сезонная декомпозиция данных. Показано, что во всех исследованных случаях временные ряды характеризуются трендами, сезонностью и циклическими компонентами, следовательно, методика прогнозирования должна носить статистический характер. Установлено, что необходимым требованиям отвечает методика программного пакета Prophet, использование которого обеспечивает удовлетворительный прогноз на период, достаточный для превентивного регулирования водоочистки. Рекомендована экстраполяция методики на другие непостоянные показатели состава и свойств природной воды в целях устойчивого водоснабжения.

Ключевые слова: водоподготовка, мутность воды, математическое моделирование, Prophet, временные ряды, сезонная декомпозиция, прогноз качества природной воды

Формат цитирования: Розенталь О.М., Самбурский А.Г. Краткосрочный прогноз мутности природной воды для оперативного регулирования режима ее водоочистки. Природообустройство. 2026;Т.19(3):106-114. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-106-114>

Scientific article

SHORT-TERM FORECASTING OF NATURAL WATER TURBIDITY FOR OPERATIONAL REGULATION OF ITS WATER TREATMENT

O.M. Rozental¹, A.G. Samburskii²✉^{1,2} Institute of water problems of RAS, Moscow, Russian Federation¹ omro3@yandex.ru; ORCID0000-0001-6261-6060² alex-sambursky@yandex.ru; ORCID0009-0004-8051-1173

Abstract. The aim of this study is to develop a methodology for short-term forecasting of natural water turbidity in order to enable prompt regulation of the coagulation-filtration treatment process. The quality of natural water is subject to variability that necessitates operational adjustment of the water treatment regime. Such regulation can be effective only if changes in the hydrochemical composition of the raw water are anticipated through analysis and forecasting. This problem was addressed in relation to the turbidity of water supplied to the water treatment facilities of Angarsk, Ussuriysk, and Khabarovsk. The study employed autocorrelation analysis and seasonal decomposition of the data, which revealed that in all examined cases the time series exhibited trends, seasonality, and cyclical components. Consequently, the forecasting methodology must be statistical in nature. It was established that the methodology implemented in the Prophet software package meets the necessary requirements, providing a satisfactory forecast over a time horizon sufficient for preventive regulation of the water treatment process. The extrapolation of this methodology is recommended for other variable indicators of the composition and properties of natural water to support sustainable water supply

Keywords: water treatment, turbidity of water, mathematical modeling, Prophet, time series, seasonal decomposition, natural water quality forecasting

For citation: Rozental O.M., Samburskii A.G. Short-term forecasting of natural water turbidity for operational regulation of its water treatment. *Prirodoobustrojtvo*. 2026;19(3):106-114. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-106-114>

Введение. Задача устойчивого водопользования закреплена в международных [1, 2] и национальных нормативных документах [3]. Однако ее реализация значительно усложняется в условиях почти повсеместной необходимости предварительного удаления избыточных примесей, состав и свойства которых непрерывно меняются [4]. По этой причине необходимо постоянное регулирование режима водоочистки – например, широко распространенного процесса коагуляции, позволяющего отфильтровать большую часть высокодисперсных частиц из воды. Трудность заключается в том, что коагуляция – многофакторный процесс, зависящий от марки, дозы и концентрации реагентов, характера и длительности перемешивания, температуры, состава и свойств примесей [5-7], поэтому эффективным его регулирование может быть только при условии раннего предупреждения об изменении качества природной воды, прежде всего – ее мутности [8, 9]. Следовательно, актуальной является задача прогноза, позволяющая обосновать выбор реагентов (коагулянтов, флокулянтов) и режима их использования [10, 11].

Цель исследований: разработка методики краткосрочного прогноза мутности природной воды для создания условий оперативного регулирования технологии ее коагуляционно-фильтрационной очистки.

Материалы и методы исследований. Были исследованы временные ряды указанного показателя, полученные с периодичностью контроля ~45 мин измерительным комплексом «КИМ» (рис. 1) [12] на водоканалах городов

Ангарск, Уссурийск и Хабаровск в период 2021-2023 гг.

Для предварительной обработки данных перед началом основного анализа использовался метод фильтрации с удалением членов, соответствующих квантилям 1 и 97%. В рамках работы исследовались как полные временные, так и выборочно укороченные (отрезки в 50 измерений) ряды.

Для исследования структуры временных рядов использовался автокорреляционный анализ как для исходных длинных (ACF до 1000 лагов), так и для укороченных (ACF до 40 лагов) рядов. Дополнительно для укороченных рядов была проведена сезонная декомпозиция с выделением трендов и сезонных компонент.

С учетом проведенных предварительных исследований рассматриваемых временных рядов в целях прогноза было принято использовать библиотеку Prophet, осуществляющую декомпозицию на тренд, сезонность и «праздничные» эффекты [13]. Данный выбор обусловлен тем, что в отличие от классических ARIMA, SARIMA, ARFIMA Prophet устойчив к выбросам и пропускам данных, которые часто наблюдаются при работе на реальных объектах.

Для оценки качества прогноза использовались следующие метрики: MAPE, MAE, RMSE, коэффициент детерминации R^2 . Помимо этого, проводилась проверка остатков модели на нормальность с оценкой асимметрии, эксцесса и индекса перекрытия нормальным распределением, а также тестов Шапиро-Уилка и Д'Агостино-Пирсона [14, 15].

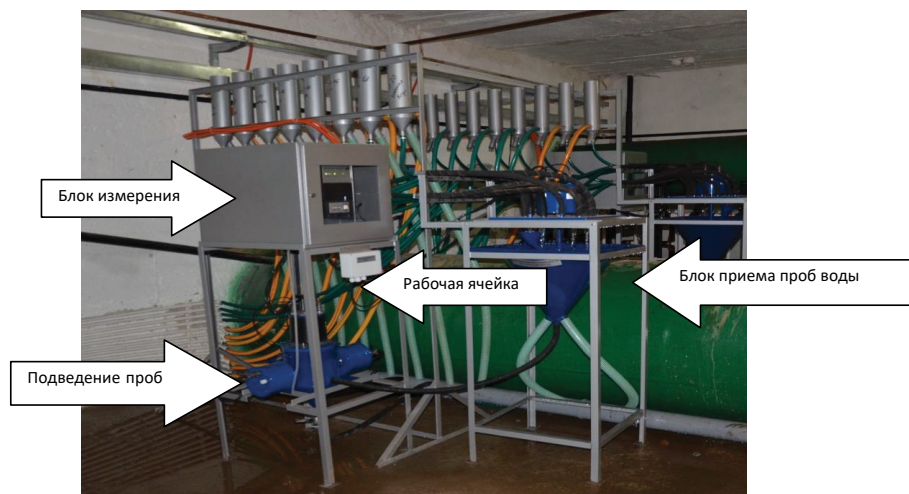


Рис. 1. Схема установки «КИМ»

Fig. 1. «CMM» installation diagram

Результаты и их обсуждение. Из данных рисунка 2 следует, что устойчивого подобию рядов мутности воды до очистки и после нее практически не наблюдается. Из формы этих рядов можно предположить, что службы водоканалов пытались регулировать режим водоочистки. Так, при повышении качества природной воды во второй половине рассматриваемого периода измерений заметным является стремление сохранить уровень мутности после водоочистки, оказавшееся успешным в Хабаровске (рис. 2в) и безуспешным в Ангарске (рис. 2а). В целом же на всех трех водоочистных станциях не удалось обеспечить стабилизацию получаемой мутности и предотвратить регулярные выбросы.

Вывод подтверждают результаты исследований на коротких временных интервалах. Таким является пример изменения мутности воды

до водоочистки и после нее, приведенный на рисунке 3. Как видим, несмотря на постепенный рост мутности воды в Хабаровске утром 6 февраля (рис. 3в), удалось сохранить качество очищенной воды. При этом неожиданное повышение мутности на водоканалах Ангарска и Уссурийска вечером 5 февраля (рис. 3а, б) не сопровождалось повышением эффективности водоочистки.

Результаты сравнения необработанных временных рядов мутности природной и очищенной воды (рис. 2, 3) указывают на важность прогнозирования, которое позволило бы оперативно реагировать не только на постепенное (рис. 3в), но и на неожиданное изменение состава природной воды (рис. 3а, б).

Трудности предвидения резких изменений мутности обусловлены разбросом (вариативностью) временных рядов контролируемых

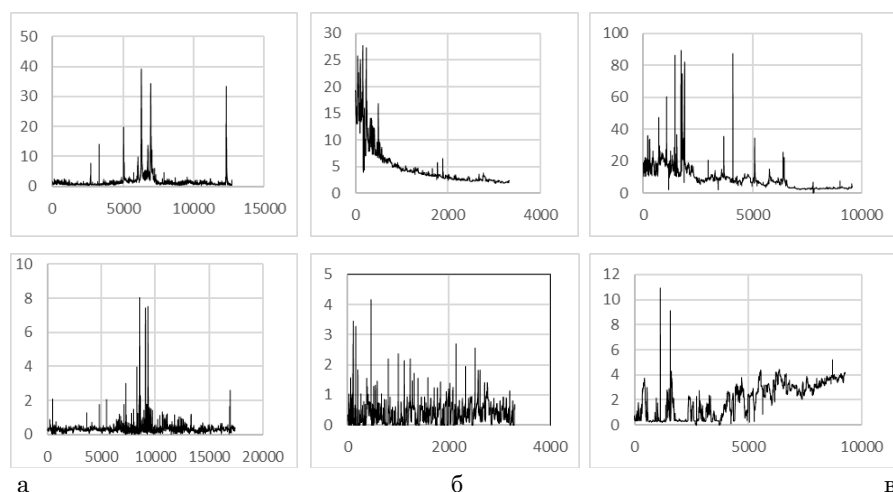


Рис. 2. Сравнение графиков мутности речной и кондиционированной воды в течение года: а – Ангарск; б – Уссурийск; в – Хабаровск (сверху – речная вода, снизу – вода после фильтров)

Fig. 2. Comparison of turbidity graphs of river and conditioned water during the year (a – Angarsk, b – Ussuriysk, c – Khabarovsk). Above is river water, below is water after filters

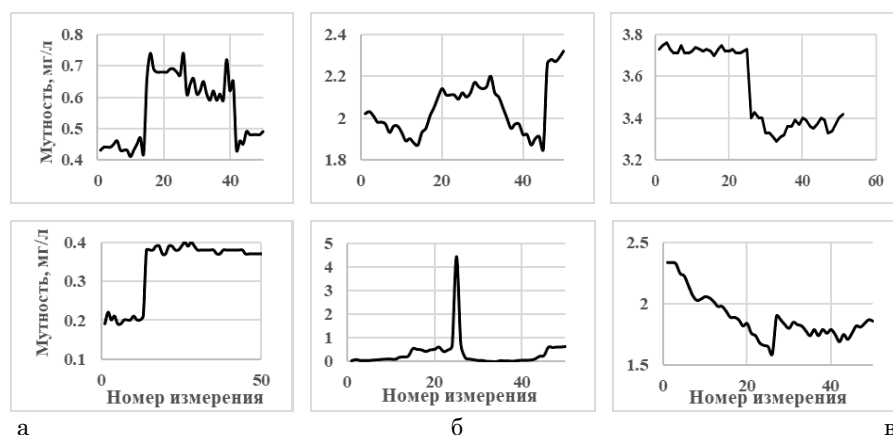


Рис. 3. Сопоставление временных рядов мутности речной (верхний ряд) и кондиционированной (нижний ряд) воды для Ангарска (а), Уссурийска (б), Хабаровска (в) за период 05.02.2023-06.02.2023 гг.

Fig. 3. Comparison of time series of turbidity of river (upper row) and conditioned water (lower row) for Angarsk (a), Ussuriysk (b), Khabarovsk (c) for the period 05.02.2023-06.02.2023

показателей. От характера этой вариабельности, наличия тренда, сезонности, остаточных компонент и других скрытых паттернов зависят точность и надежность используемых методик прогнозирования. Поэтому перед ее выбором был выполнен статистический анализ массивов экспериментальных данных.

Из данных рисунков 2, 3 следует, что экспериментальные ряды в большом количестве содержат резко выделяющиеся нетипичные члены. В гидрохимии они нередко появляются вследствие ошибок оператора. Для повышения достоверности дальнейшего анализа данных такие выбросы целесообразно отфильтровать и получить «стандартизованный» временной ряд. Эта работа была выполнена путем удаления членов из экспериментальных рядов значений мутности, соответствующих квантилям менее 1% и более 97%.

Далее выполнялось исследование структуры временных рядов с помощью автокорреляционного анализа. Типичная автокоррелограмма (ACF) сравнительно длинных рядов приведена на рисунке 4, где на оси абсцисс нанесены значения, связанные с задержкой (лагом). Как видим, наряду с наблюдаемыми деформациями здесь существуют также скрытые многосуточные сезонности и цикличности, которые отслеживаются по пикам разной величины, возникающим на некотором количестве лагов. Следовательно, достоверное прогнозирование на достаточно длинном горизонте без приведения временных рядов к стационарности практически невозможно. Однако стационарный ряд, выделив основные закономерности данных, удалит случайные скачки мутности, что не позволяет своевременно регулировать режим водоочистки. Поэтому были выполнены исследования исходных сравнительно коротких выборок (до 40 ч), достаточных для регулирования режима водоочистки

и являющихся более близкими к стационарному состоянию.

Типичные ACF для коротких выборок приведены на рисунке 5. Как видим, коэффициент корреляции природной воды здесь либо плавно уменьшается (Ангарск), либо испытывает очень слабые колебания (Уссурийск, Хабаровск), указывая на сильную зависимость между прошлыми и будущими значениями временных рядов. Это означает, что на выбранных интервалах времени мутность воды зависит от ее предыдущих значений настолько сильно, что ее среднее значение и стандартное отклонение слабо меняются со временем. При этом коэффициент корреляции кондиционированной воды либо увеличен (Хабаровск), либо затухает (Ангарск), либо быстро спадает, а затем снова растет, образуя один или несколько пиков (Уссурийск). Последнее свидетельствует о неустойчивости тренда, повышенной нестационарности ряда данных с присутствием дополнительной сезонности и о других повторяющихся паттернах.

Приемлемый метод прогнозирования должен быть адаптирован к описанным статистическим закономерностям – в частности, к способности отделять от тренда временных рядов их сезонность, цикличность и остаток, а также анализировать последние по отдельности. В качестве примера подлежащих такому анализу данных на рисунке 6 приведен циклический компонент коротких выборок мутности речной воды, полученный путем декомпозиции рядов данных, в долях от соответствующей трендовой компоненты.

Как видим, ритмика данных для природной и кондиционированной воды различается. Таковы, например, резкое повышение мутности на 5 и 15 минутах часовых периодов или на 3 часа 6-часовых периодов для кондиционированной воды в Ангарске при отсутствии подобных (синхронных) скачков в воде природной или

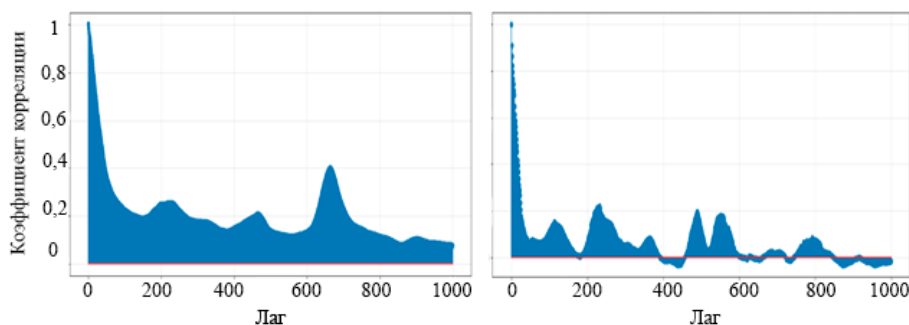


Рис. 4. ACF временных рядов мутности природной (а) и прошедшей фильтрацию (б) воды на водоканале г. Ангарска на период 1000 лагов (красная линия – граница значимости автокорреляции)

Fig. 4. ACF time series of turbidity of natural (a) and filtered (b) water at the water utility of Angarsk for the period of 1000 lags (The red line is the limit of the significance of autocorrelation)

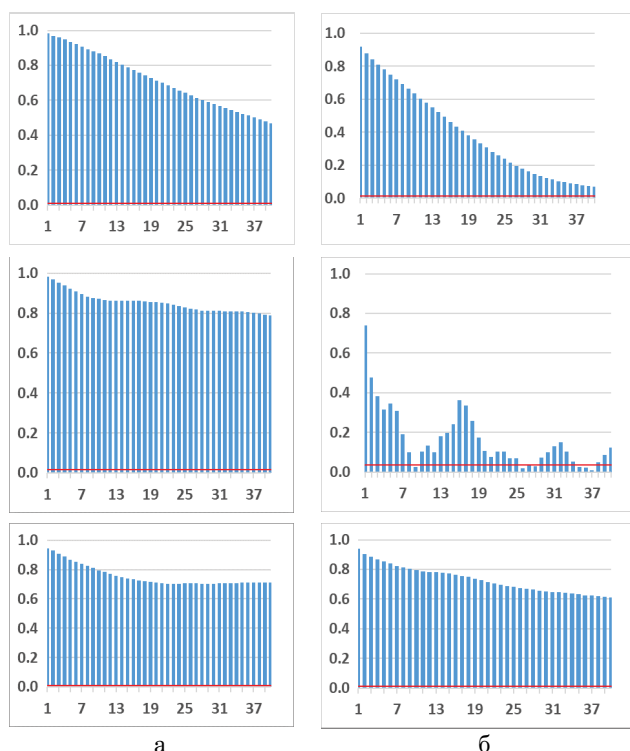


Рис. 5. Коэффициенты корреляции в зависимости от номера лага для Ангарска (верхний ряд), Уссурийска (средний ряд) и Хабаровска (нижний ряд) для природной (а) и кондиционированной (б) воды (горизонтальная линия – с уровнем значимости 0,05; красная линия – граница значимости автокорреляции)

Fig. 5. Correlation coefficients depending on the lag number for Angarsk (upper row), Ussuriysk (middle) and Khabarovsk (lower) for natural (column a) and conditioned (b) water with a significance level of 0.05 (horizontal line) The red line is the limit of the significance of autocorrelation

повышение мутности природной воды в Хабаровске на 4 часа 6-часовых периодов и на 10-12 часах суточных периодов, не сопровождавшихся подобными скачками для воды кондиционированной. В целом же результаты АСФ-анализа и декомпозиции свидетельствуют о сложной структуре вариабельности рядов мутности, что резко ограничивает выбор приемлемой методики достоверного прогнозирования ввиду возможных неожиданных всплесков и флуктуаций [16].

Для достижения цели работы необходима методика статистического прогноза, способная обнаруживать не только тренды, но и неупорядоченные изменения траекторий. Такая методика должна фиксировать точки изменения тренда и выявлять другие сложные закономерности временного ряда, устанавливая долю исторической вариации, которая ожидается в будущем.

Поиск показал, что необходимым требованиям отвечает библиотека прогнозирования Prophet, автоматически анализирующая временные ряды, подобные описанным в данной работе, даже при наличии выбросов и сложных сезонных паттернов.

Для проверки приемлемости метода в практике оперативного регулирования режима водоочистки выбирали несколько интервалов времени, на которых сравнивали фактические и прогнозные значения мутности с использованием исторических данных (50 предыдущих измерений), и на их основе Prophet определял ожидаемые значения. Последние сопоставляли с фактически обнаруженными на том же горизонте планирования. Типичные примеры результатов использования Prophet приведены на рисунке 7. Налицо подобие зависимостей, в случае данных рисунка 7а позволяющее после полуночи ослабить уровень коагуляционно-фильтрационной водоочистки, а под утро повысить или последовательно изменять в случаях, отраженных на рисунке 7б, в).

Поскольку аналогичные ситуации возникали и в большинстве проанализированных случаев, следует вывод о возможности использования исторических (предшествующих) данных о мутности сырой воды для ее удовлетворительного прогноза на период, достаточный для регулирования режима водоочистки. Достоверность этого вывода снижается при увеличении горизонта прогнозирования, что объясняется, естественно, увеличивающейся шириной доверительного интервала.

Колеблемость мутности свойственна и другим показателям состава и свойств природной воды [17], что позволяет рекомендовать использование предложенной библиотеки статистического прогнозирования не только при коагуляционно-фильтрационной обработке, но и для других методов водоочистки, – впрочем, после предварительной оценки качества прогноза, как это продемонстрировано ниже.

Из данных рисунка 7 следует, что расхождение в значениях мутности для реальных и прогнозированных значений составляет сотые единицы показателя; максимальное расхождение, обнаруженное для Ангарска, в ~3:00 (рис. 7а) не превышало 10%. Более детальное определение качества прогнозной модели Prophet на конкретных данных приведено в таблице 1.

Как видим, значения средней относительной (MAPE) и средней абсолютной (MAE) ошибок указывают на определенный разброс прогнозируемых значений, – впрочем, судя по малому MAE,

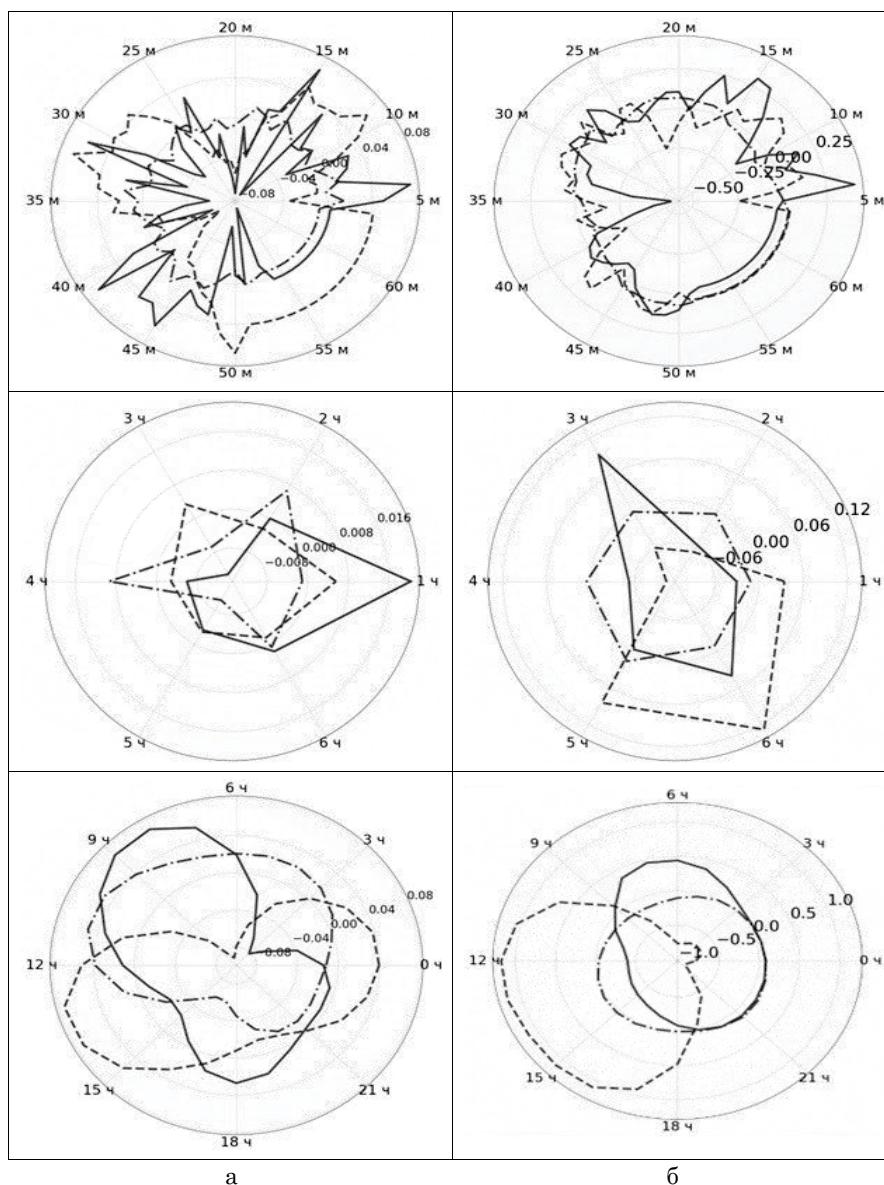


Рис. 6. Диаграммы часовых (верхний ряд), 6-часовых (средний) и суточных периодов (нижний ряд) для сезонности рядов мутности природной (а) и кондиционированной (б) воды водоканалов Ангарска (сплошная линия), Уссурийска (штриховая линия) и Хабаровска (штрих-пунктирная линия)

Fig. 6. Diagrams of hourly (top row), 6-hour (average) and daily periods (bottom row) for the seasonality of turbidity series of natural (a) and conditioned (b) water of water utilities in Angarsk (solid line), Ussuriysk (dashed line) and Khabarovsk (dashed dotted line)

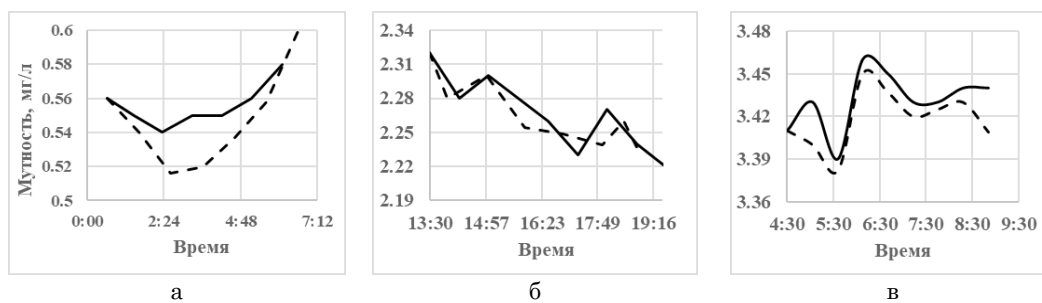


Рис. 7. Фактические (сплошная линия) и прогнозные (пунктирная линия) значения мутности с горизонтом прогнозирования 6 часов для водоканалов Ангарска (а), Уссурийска (б) и Хабаровска (в)

Fig. 7. Actual (solid line) and forecast (dotted line) turbidity values with a forecast horizon of 6 hours for water utilities in Angarsk (a), Ussuriysk (b) and Khabarovsk (c)

незначительный. Среднеквадратичная величина ошибки (RMSE) лишь незначительно превышает MAE, причем близость этих величин указывает на общий характер возникающих ошибок, предположительно связанных с погрешностью измерений. Коэффициент детерминации R^2 в случаях водоканалов Уссурийска и Хабаровска приближается к 1, что еще раз свидетельствует об удовлетворительной точности прогнозирования. Для Ангарска же этот коэффициент понижен, так что прогноз обеспечивает предсказание около 2/3 вариабельности мутности.

Таблица 1. Метрики качества модели

Table 1. Model quality metrics

Показатель / Indicator	Исходная вода / Source water		
	Ангарск / Angarsk	Уссурийск / Ussuriysk	Хабаровск / Khabarovsk
MAPE	6,07%	1,32%	0,50%
MAE	0,0333	0,03	0,02
RMSE	0,0388	0,03	0,03
R^2	0,6796	0,9023	0,9801

Чтобы определить, насколько хорошо выбранная модель описывает данные, был выполнен также анализ «остатков» (разности между спрогнозированным моделью и фактическим значениями) на их нормальность. Из данных таблицы 2 следует, что гипотеза о нормальности отвергалась только для Хабаровска. Было учтено, что тест Шапиро-Уилка часто допускает ложноотрицательные результаты. Поэтому дополнительно использовался статистический тест Д'Агостино-Пирсона, проверяющий, похожа ли форма распределения на нормальное распределение (соответственно знаки «+» и «-»), а также рассчитывался индекс перекрытия нормальным распределением (сравнение площадной функции распределения изучаемого ряда данных с нормальным). Результаты, приведенные в таблице 2, указывают, что при проверке этими методами остатки были нормально распределены. В частности, индекс перекрытия превышал 0,9, что повышает доверие к выполненному статистическому прогнозу.

Таблица 2. Результаты анализа остатков модели на нормальность (+ – распределение соответствует нормальному, – – не соответствует)

Table 2. Results of the analysis of model residues for normality (+ – the distribution corresponds to the normal, – does not conform)

Показатель / Indicator	Исходная вода / Source water			Фильтрованная вода / Filtered water		
	Ангарск / Angarsk	Уссурийск / Ussuriysk	Хабаровск / Khabarovsk	Ангарск / Angarsk	Уссурийск / Ussuriysk	Хабаровск / Khabarovsk
Асимметрия / Asymmetry	0,1793	-0,1390	0,0351	-0,0672	0,2166	-0,3415
Экссесс / Excess	1,8117	3,2293	5,6613	3,0640	2,5097	2,7599
Тест / Test Шапиро-Уилка / Shapiro-Wilk	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)
Тест / Test Д'Агостино-Пирсона / D'Agostino Pearson	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Индекс перекрытия нормальным распределением / Normal distribution overlap iIndex	0,952	0,96	0,918	0,963	0,933	0,934

Выводы

1. Показатели состава и свойств природной воды – такие, как ее мутность, являются непостоянными, что снижает эффективность водоочистки, если она выполняется в стационарном режиме.

2. Изменение режима водоочистки – реальная задача при условии получения информации о предстоящем повышении/снижении контролируемой характеристики качества воды, то есть при условии своевременного и достоверного прогноза.

3. В работе на примере одной из характеристик качества воды – мутности – показано, что массивам экспериментальных данных этой

характеристики качества, исследованной на различных водоканалах, свойственны меняющийся свое направление тренд, сезонность и цикличность. Поэтому достоверный прогноз даже на часовом или суточном горизонтах должен носить статистический характер.

4. Методика такого прогноза, способная выявлять и учитывать сложные временные закономерности в данных с их преобразованием в суперпозиции более простых функций и с установлением доли исторической вариации, которая ожидается в будущем, реализована в программном пакете Prophet и была протестирована в данной работе. Как оказалось, предлагаемый метод прогноза обеспечивает различие величин

фактических и прогнозных данных, не превышающее 10%. Такое соответствие между прогнозом и реальными данными сохраняется в течение ~6 часов, достаточных для регулирования режима системы водоочистки. Эта и ряд других метрик анализа качества позволяет рекомендовать выбранную прогнозную модель для практического использования в регулировании технологических процессов водоподготовки и очистки воды – например, при адаптации метода

к оперативному регулированию коагуляционной обработки.

5. С учетом подобия характера изменчивости рядов мутности и других характеристик состава природной воды предложенный метод прогноза может быть рекомендован для оперативного регулирования не только коагуляционно-фильтрационного процесса, но и других способов водоочистки в целях устойчивого водопользования.

Список использованных источников

1. ISO 24510:2024. Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the assessment and for the improvement of the service to users.
2. ISO 24511:2024. Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the management of wastewater utilities and for the assessment of wastewater service.
3. ГОСТ Р ИСО 46001-2023. Системы менеджмента эффективности водопользования. Требования и руководство по применению. <https://internet-law.ru/gosts/gost/79674/?ysclid=mqt81jnnww0710038418>
4. Драгинский В.Л. Особенности применения коагулянтов для очистки природных цветных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2008. № 1. С. 14-16.
5. Гетманцев С.В. Система выбора эффективных технологий очистки природных вод с применением алюмосодержащих коагулянтов // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 8. С. 4-9.
6. Baxter C.W., Stanley S.J., Zhang Q. (1999). Development of a full-scale artificial neural network model for the removal of natural organic matter by enhanced coagulation. *Aqua*. 48. Pp. 129-136.
7. Gagnon C., Grandjean B.P.A., Thibault J. (1997). Modelling of coagulant dosage in a water treatment plant. *Artif. Intell. Eng.* 11. Pp. 401-404.
8. Бубыр Д.С., Клячкин В.Н. Управление дозами реагентов при очистке питьевой воды // Водоочистка. 2023. № 4. С. 4-13.
9. Гришин Б.М., Бикунова М.В., Сафронов М.А., Титов Е.А. Реагентная обработка поверхностных природных вод алюмосодержащими коагулянтами: Монография. Пенза: ПГУАС, 2016. 140 с.
10. Wu G.D., Lo S.L. (2008). Predicting real-time coagulant dosage in water treatment by artificial neural networks and adaptive network-based fuzzy inference system. *Eng Appl Artif Intell*. № 21(8). Pp. 1189-1195
11. Эпоян С.М., Благодарная Г.И., Душкин С.С., Сташук В.А. Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды: Монография. Харьков: ХНАГХ, 2013. 190 с.
12. Штернер С.Р., Нестеров Ю.В. Контрольно-измерительные и управляющие модули для оптимизации технологического процесса реагентной очистки воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 4. С. 46-51.
13. Li Y., Ma Z., Pan Z., Liu N. et al. Prophet model and Gaussian process regression based user traffic prediction in wireless networks. *Science China Information Sciences*. 2020. V. 63, № 4. P. 142301.
14. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б. Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона // Метрология. 2005. № 2. С. 3-23.
15. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Веретельникова И.В. О применении критериев проверки однородности законов распределения // Вестник Томского государственного

References

1. ISO 24510:2024. Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the assessment and for the improvement of the service to users.
2. ISO 24511:2024. Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the management of wastewater utilities and for the assessment of wastewater services.
3. GOST R ISO 46001-2023. Water Use Efficiency Management Systems. Requirements and guidance for use. <https://internet-law.ru/gosts/gost/79674/?ysclid=mqt81jnnww0710038418>
4. Draginsky V.L. Features of the use of coagulants for cleaning natural colored waters. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2008. № 1. P. 14-16
5. Getmantsev S.V. System of selecting effective technologies for natural water treatment using aluminum-containing coagulants. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2011. No 8. P. 4-9.
6. Baxter C.W., Stanley S.J., Zhang Q. (1999) «Development of a full-scale artificial neural network model for the removal of natural organic matter by enhanced coagulation». *Aqua*, 48, 129-136.
7. Gagnon C., Grandjean B.P. A., Thibault J. (1997) «Modelling of coagulant dosage in a water treatment plant». *Artif. Intell. Eng.*, 11, 401-404.
8. Buby D.S., Klyachkin V.N. Dose management of reagents in drinking water treatment. *Water Treatment*, No 4, 2023. P. 4-13.
9. Grishin B.M., Bikunova M.V., Safronov M.A., Titov E.A. Reagent treatment of surface natural waters with aluminum-containing coagulants: monograph. Penza: PSUAS, 2016. 140 p.
10. Wu G.D., Lo S.L. (2008) «Predicting real-time coagulant dosage in water treatment by artificial neural networks and adaptive network-based fuzzy inference system». *Eng Appl Artif Intell*. 21(8), 1189-1195.
11. Epoyan S.M., Blagodarnaya G.I., Dushkin S.S., Stashuk V.A. Improving the Efficiency of Facilities in Drinking Water Treatment. Kharkov: Monografiya. KhNAGH, 2013. 190 p.
12. Shterner S.R., Nesterov Yu.V. Control, Measuring and Control Modules for Optimization of the Technological Process of Reagent Water Treatment Water supply and sanitary technique. 2014. No 4. P. 46-51.
13. Li Y., Ma Z., Pan Z., Liu N. et al. «Prophet model and Gaussian process regression based user traffic prediction in wireless networks». *Science China Information Sciences*. 2020. V. 63, № 4, 142301.
14. B.Yu. Lemesko S.B. Lemesko. Comparative analysis of the criteria for checking the deviation of distribution from the normal law // *Metrology*, 2005, No 2, P. 3-23. Б.Ю.
15. Lemesko B.Yu., Lemesko S.B., Veretelnikova I.V. On the application of criteria for checking the homogeneity of distribution laws / *Bulletin of Tomsk State University. Management, Computer Engineering and Informatics* No 41, 2017. P. 24-31. EDN: YLDFFG

университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 41. С. 24-31. EDN: YLDFFG

16. Сурина А.В. Анализ временных рядов: Учебное пособие. СПб.: Издательство Политехнического университета Петра Великого, 2025. 90 с.

17. Данилов-Данильян В.И., Розенталь О.М. Гипотеза о причинах сильной изменчивости концентрации примесей в природных водах // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 509, № 1. С. 114-119. DOI: 10.31857/S2686739722602502

Информация об авторах

Олег Моисеевич Розенталь, д-р техн. наук., главный научный сотрудник Института водных проблем РАН, SPIN-код: 4857-7570, ORCID: 0000-0001-6261-6060, Author ID639330, SPIN-код 4856-7570; omro3@yandex.ru

Алексей Георгиевич Самбурский, аспирант Института водных проблем РАН, SPIN-код: 8760-5750, ORCID: 0009-0004-8051-1173; alex-sambursky@yandex.ru

16. Surina A.V. Analysis of Time Series: Textbook. St. Petersburg: Publishing House of Peter the Great Polytechnic University, 2025. 90 p.

17. Danilov-Danilyan V.I., Rozental O.M. Hypothesis about the causes of strong variability of the concentration of impurities in natural waters // Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences. 2023. V. 509, No 1, P. 114-119. DOI: 10.31857/S2686739722602502.

Information about the authors

Oleg M. Rozental, DSs (Eng), Chief Researcher, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, SPIN-code: 4857-7570, ORCID: 0000-0001-6261-6060, Author ID639330, SPIN-code 4856-7570; omro3@yandex.ru

Aleksei G. Samburskii, Postgraduate student, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, SPIN-code: 8760-5750, ORCID: 0009-0004-8051-1173; alex-sambursky@yandex.ru

Вклад авторов

О.М. Розенталь – обеспечил: идею работы, ее методы и анализ результатов, обсуждение результатов

А.Г. Самбурский – подготовка результатов, совместное обсуждение результатов

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 28.11.2025

Поступила после рецензирования / Received peer review 04.06.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted for publication after revision 08.06.2026

Contribution of the authors

O.M. Rozental – provided: the idea of the work, its methods and analysis of the results, discussion of the results

A.G. Sambursky – preparation of results, joint discussion of the results