

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Федерального государственного

бюджетного учреждения науки

Геофизического центра Российской академии наук

А.А. Соловьев

«14» июля 2026 г



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Крохина Георгия Борисовича «Исследование закономерностей формирования гидрохимических показателей природной воды в условиях различной антропогенной нагрузки»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 1.6.21 – «Геоэкология»

Диссертационная работа Крохина Георгия Борисовича посвящена разработке и обоснованию принципов анализа гидрохимических данных, позволяющих выявить закономерности временных рядов (долговременную память, цикличность, причинно-следственные связи) и повысить репрезентативность оценки качества воды.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 132 страницах. Исследования выполнены на материалах многолетних гидрохимических наблюдений за водными объектами, существенно различающимися по характеру и интенсивности антропогенного воздействия: рекой Исеть, Исаковским водохранилищем и рекой Катунь.

Актуальность темы выполненной работы и ее связь с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства.

Обеспечение экологической безопасности водных объектов, повышение надежности оценки качества природных вод и развитие систем предупреждения неблагоприятных изменений их состояния относятся к приоритетным задачам современной геоэкологии и управления водными ресурсами. Особую актуальность эти задачи приобретают в условиях возрастающей антропогенной нагрузки, климатической изменчивости, зарегулирования речного стока, трансформации водосборных территорий и накопления значительных массивов разнородных данных государственного и производственного мониторинга.

Существующие методы оценки состояния поверхностных вод в значительной мере основаны на сопоставлении отдельных результатов наблюдений с нормативными значениями, расчете средних концентраций, интегральных индексов загрязнения и анализе относительно простых корреляционных зависимостей. Такие подходы необходимы для нормативного контроля, однако не всегда позволяют учитывать нестационарность, неоднородность, наличие временных задержек, циклических компонент и долговременных зависимостей в динамике гидрохимических показателей.

В то же время накопленные за многолетний период массивы гидрохимических наблюдений содержат информацию не только об абсолютных значениях концентраций, но и о внутренней структуре их изменений. Выявление этой структуры требует применения методов анализа временных рядов, нелинейной статистики, геоинформатики и математического моделирования. Развитие таких методов соответствует современному направлению перехода от преимущественно описательного контроля состояния окружающей среды к прогнозно-аналитическим системам геоэкологического мониторинга.

В работе рассматривается актуальная научная задача повышения информативности гидрохимических наблюдений путем выявления скрытых закономерностей, характеризующих устойчивость, инерционность и связанность изменений показателей качества воды. Автором исследуются временные ряды концентраций растворенных веществ, формирующиеся под совместным воздействием природных гидрологических, гидрохимических, биогеохимических и антропогенных факторов.

Таким образом, тема диссертационной работы Г.Б. Крохина является актуальной, соответствует современным задачам геоэкологии и направлена на развитие методического обеспечения анализа и прогнозирования состояния поверхностных вод.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научная новизна диссертационной работы определяется комплексным применением методов анализа нестационарных временных рядов для изучения закономерностей изменения гидрохимических показателей природных вод.

Автором показано, что временные ряды концентраций растворенных веществ не могут во всех случаях рассматриваться как совокупность исключительно случайных отклонений относительно среднего или сезонного тренда. На примере трех различающихся по антропогенной нагрузке водных объектов установлено наличие в динамике гидрохимических показателей детерминированной составляющей, проявляющейся в форме долговременной памяти, персистентности и повторяющихся временных структур.

В работе адаптирована и применена последовательная схема R/S-анализа гидрохимических временных рядов. В отличие от расчета единственного обобщенного показателя Херста для всего массива наблюдений автор анализирует изменение характеристик нормированного размаха при последовательном сокращении временного ряда. Это позволило оценивать устойчивость выявляемой памяти и определять характерные временные интервалы, интерпретируемые как «глубина памяти» исследуемого показателя.

Важным результатом является сопоставление R/S-анализа с фазовыми траекториями, автокорреляционными функциями и периодограммами. Такое сочетание методов позволило автору не ограничиваться формальной оценкой показателя Херста, а исследовать структуру циклов и квазициклов, в том числе вложенность короткопериодных изменений в более длительные колебательные процессы.

Для оценки сходства гидрохимических временных рядов, полученных на различных створах, автором применен метод динамической трансформации временной шкалы – DTW-анализ. Использование данного алгоритма позволило сопоставлять форму временных рядов при наличии временных смещений и различий в скорости протекания процессов. В результате выявлен эффект сохранения, или «наследования», отдельных особенностей гидрохимической динамики по направлению движения водного потока.

Значимым элементом научной новизны является совместное применение теста причинности по Грейнджеру и коинтеграционного анализа Йохансена. Такое сочетание позволило разделить краткосрочные направленные статистические связи и долгосрочные равновесные отношения между гидрохимическими показателями. Автором показано, что некоторые параметры, демонстрирующие слабую обычную корреляцию, могут быть связаны посредством лаговых зависимостей или совместного долгосрочного тренда.

На этой основе предложено использовать совокупность причинных и коинтеграционных связей как дополнительный диагностический признак при анализе общности факторов формирования химического состава воды и возможной связи показателей с едиными источниками поступления веществ. Данный подход имеет значение для совершенствования информационно-аналитического обеспечения геоэкологического мониторинга.

Автором усовершенствована схема прогнозирования гидрохимических временных рядов с использованием моделей SARIMA. В качестве параметра сезонности предложено использовать не только фиксированный годовой цикл, но и индивидуально определенную для каждого ряда «глубину памяти». Проведенное сопоставление показало, что учет внутренней цикличности в ряде случаев повышает точность прогнозирования по

сравнению с моделями, в которых сезонность заранее принимается равной двенадцати месяцам.

Отдельный результат диссертационной работы связан с интерпретацией высокой изменчивости гидрохимических показателей с позиций открытых неравновесных систем. Автор рассматривает взаимосвязь гидродинамических, молекулярно-кинетических и биогеохимических факторов, способных поддерживать неоднородность и колебательный характер химического состава природных вод.

Показано, что противофазная динамика отдельных гидрохимических показателей может воспроизводиться с помощью систем дифференциальных уравнений и анализироваться посредством фазовых портретов. Полученный результат расширяет представление о возможных механизмах упорядоченности гидрохимических временных рядов и формирует основу для дальнейшего построения процессно-статистических моделей.

Таким образом научная новизна работы заключается в последовательном объединении статистических методов в единую схему: выявление внутренней структуры временных рядов – оценка пространственно-временного сходства – установление краткосрочных и долгосрочных связей – построение прогнозной модели – содержательная интерпретация выявленных закономерностей.

Значимость для науки и производства, полученных автором диссертации результатов, сопоставление полученных результатов с уровнем современной науки.

В работе автор развивает методы анализа природных временных рядов применительно к задачам геоэкологической оценки состояния поверхностных вод.

Современные исследования качества воды развиваются по нескольким направлениям. Первое связано с использованием детерминистических моделей стока, переноса и трансформации веществ, требующих значительного объема гидрологической, метеорологической и геохимической информации. Второе направление основано на статистическом и машинном анализе данных мониторинга. Третье предусматривает применение гибридных методов, объединяющих физическое представление о процессах и выявляемые из данных закономерности.

Работа Г.Б. Крохина относится ко второму и частично третьему направлениям. Ее отличительной особенностью является акцент на исследовании внутренней структуры накопленных временных рядов без необходимости построения детальной пространственно-распределенной модели водосбора. Такой подход не заменяет гидрологическое и гидрохимическое моделирование, но дополняет его, позволяя получать информацию в

условиях ограниченности исходных данных о расходах воды, метеорологическом режиме, структуре сбросов и трансформации вещества.

Полученные автором оценки долговременной памяти и внутренней цикличности могут использоваться при выборе временного шага наблюдений, определении продолжительности анализируемых интервалов, восстановлении пропусков, выборе структуры прогнозной модели и оценке вероятности появления повышенных концентраций.

Применение DTW-анализа представляет интерес для сопоставления данных разных створов, когда изменения гидрохимического состава проявляются с временной задержкой или различной скоростью. Это особенно важно при анализе распространения загрязняющих веществ по речной сети, поскольку обычные коэффициенты корреляции могут не отражать сходство временных рядов при наличии фазового сдвига.

Сочетание теста Грейнджера, анализа коинтеграции и модели коррекции ошибок соответствует современному уровню анализа многомерных временных рядов. Его применение к гидрохимическим показателям позволяет выделять статистически устойчивые связи, которые могут использоваться для формирования гипотез о совместных источниках поступления веществ, сопряженности процессов миграции и трансформации, а также для выбора предикторов при построении прогнозных моделей.

Практическая значимость работы заключается в возможности повышения информативности действующих систем гидрохимического мониторинга без обязательного изменения состава измеряемых показателей. Предложенные алгоритмы могут применяться к уже накопленным массивам наблюдений Росгидромета, ведомственных лабораторий, водоканалов, промышленных предприятий и организаций, осуществляющих производственный экологический контроль.

Результаты исследования могут использоваться:

- при разработке информационно-аналитических систем мониторинга качества поверхностных вод;
- при оптимизации частоты отбора проб и продолжительности рядов наблюдений;
- при выявлении взаимосвязанных групп гидрохимических показателей;
- при построении краткосрочных статистических прогнозов;
- при оценке вероятности появления аномально высоких концентраций;
- при предварительном выявлении участков водных объектов, характеризующихся различным режимом формирования качества воды;
- при формировании признакового пространства для автоматизированной классификации гидрохимического состояния водных объектов.

Полученные результаты легли в основу проектов двух национальных стандартов: ГОСТ Р 72538-2026 «Охрана окружающей среды. Охрана водных объектов. Методика оценки риска ошибочного определения фонового содержания загрязняющих веществ в водных объектах» и ГОСТ Р 72527-2026 «Охрана окружающей среды. Охрана водных объектов. Методика выбора очистки системы воды по критерию эффективности».

По своему методическому уровню работа соответствует современным направлениям анализа временных рядов природных процессов. Ее научная ценность определяется адаптацией соответствующих методов к гидрохимическим данным, их объединением в последовательную аналитическую схему и проверкой на нескольких контрастных водных объектах.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при развитии систем государственного, территориального и производственного мониторинга поверхностных вод.

Разработанные алгоритмические решения могут быть включены в состав программных комплексов обработки гидрохимических данных и геоинформационных систем экологического мониторинга. В частности, целесообразно предусмотреть автоматизированный расчет показателей персистентности, оценку характерных временных масштабов, построение матриц причинных и коинтеграционных связей, а также сравнение альтернативных параметров сезонности при прогнозировании.

Результаты работы могут быть использованы подразделениями Росгидромета, бассейновыми водными управлениями, научно-исследовательскими организациями, водоканалами и промышленными предприятиями, осуществляющими контроль сбросов и состояния водных объектов.

Целесообразно продолжить исследования на более широком наборе водных объектов, включая малые реки урбанизированных территорий, водохранилища комплексного назначения, трансграничные водотоки и участки, подверженные воздействию горнодобывающих предприятий. Это позволит оценить переносимость установленных закономерностей на другие гидрологические и геохимические условия.

Замечания и вопросы к диссертационной работе

1. В диссертационной работе недостаточно подробно рассмотрено влияние качества исходных данных на результаты статистического анализа. В частности, не приведены систематизированные сведения о доле пропущенных значений, изменениях периодичности наблюдений, пределах обнаружения контролируемых веществ, а также о возможной смене

лабораторных методик в течение исследуемого периода. Между тем указанные факторы могут существенно влиять на однородность временных рядов и достоверность полученных статистических выводов.

2. В ряде случаев результаты статистического анализа интерпретируются как подтверждение причинно-следственных связей и общности источников поступления загрязняющих веществ. Вместе с тем тест причинности Грейнджера и коинтеграционный анализ позволяют выявлять статистические зависимости между временными рядами, но сами по себе не дают оснований для однозначного установления физического или геохимического механизма этих связей. В связи с этим представляется необходимым более четко разграничить статистическую обусловленность, причинную связь и интерпретацию возможных источников загрязнения.

3. В главе 3 недостаточно подробно описана процедура выбора параметров моделей, применяемых при анализе причинности и коинтеграции. Не приведены в систематизированном виде результаты выбора порядка лагов, проверки стационарности временных рядов и диагностики остатков моделей. Кроме того, при анализе большого числа пар гидрохимических показателей целесообразно учитывать вероятность получения случайно значимых связей и применять поправки на множественные статистические сравнения.

4. В главе 3 показано, что применение «глубины памяти» временного ряда в качестве параметра сезонности модели SARIMA позволяет повысить точность прогнозирования. Однако в работе не приведено сопоставление предложенного подхода с простейшими базовыми моделями прогноза. Такое сравнение позволило бы более полно оценить вклад предложенного автором способа определения сезонности в повышение точности прогноза.

5. В главе 4 противофазные колебания гидрохимических показателей рассматриваются как проявление автоколебательных процессов в открытой неравновесной системе. Вместе с тем предложенные дифференциальные модели имеют преимущественно феноменологический характер, а физический смысл их параметров и выполнение баланса вещества раскрыты не в полной мере.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 7 печатных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, RSCI и входящих в перечень журналов ВАК Минобрнауки России.

Основные научные положения, результаты и выводы работы соответствуют паспорту специальности 1.6.21 – «Геоэкология». Автореферат соответствует структуре и содержанию диссертации.

Диссертация Крохина Георгия Борисовича «Исследование закономерностей формирования гидрохимических показателей природной воды в условиях различной антропогенной нагрузки», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании теоретических исследований и анализа многолетних гидрохимических наблюдений решена актуальная научная задача повышения информативности оценки качества природных вод путем выявления долговременной памяти, внутренней цикличности, краткосрочных и долгосрочных связей между гидрохимическими показателями и использования установленных закономерностей для прогнозирования их изменения.

Работа соответствует п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней НИТУ МИСИС. Автор Крохин Георгий Борисович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.21 – «Геоэкология» по результатам публичной защиты.

Настоящая работа обсуждалась на заседании лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН 14 июля 2026 г., протокол №2 и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Татаринов Виктор Николаевич

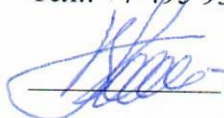
член-корреспондент РАН, доктор технических наук

Заместитель директора по науке, заведующий лабораторией геодинамики, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук

Адрес: 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д.3, ГЦ РАН

E-mail: v.tatarinov@gcras.ru

Тел.: +7 495 930-05-46

 / Татаринов В.Н.

Подпись Татаринова Виктора Николаевича заверяю.

Красноперов Роман Игоревич

к.ф.-м.н., ученый секретарь ГЦ РАН

 / Красноперов Р.И.

«1» июля 2026 г.

