
ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 544.54

ХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ НИТРИТОВ И ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Х. Ф. МАМЕДОВ¹⁾, С. Г. ХАСАЕВА¹⁾

¹⁾Министерство науки и образования Азербайджана, Институт радиационных проблем,
ул. Бахтияра Вахабзаде, 9, AZ1143, г. Баку, Азербайджан

В исследовании приведены результаты комплексных полевых наблюдений и лабораторных анализов, направленных на детальное изучение и выявление закономерностей химических механизмов образования нитритов в воде р. Араз. Эти процессы формируются под воздействием различных источников антропогенного загрязнения, включая промышленные и сельскохозяйственные стоки, и сопровождаются существенными изменениями гидрохимического состава водной среды, отражающимися на концентрациях основных ионов, окислительно-восстановительном потенциале и температурных характеристиках реки. Исследования проводились в разные сезоны года на трех ключевых участках – в Садаракском, Ордубадском и Бейлаганском р-нах, что позволило оценить пространственно-временную динамику загрязнения. Отбор проб выполнялся с соблюдением стандартов GOST/AZS, химический анализ проводился спектрофотометрическими, титриметрическими и ионообменными методами. Определялись концентрации нитритов, нитратов, хлоридов и других неорганических веществ, а также значения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП). Результаты свидетельствуют, что максимальные концентрации нитритов (0,145 мг/л), нитратов (12,8 мг/л) и хлоридов (238 мг/л) зафиксированы в Садаракском р-не и связаны с высокой минерализацией воды и активными хлорокислительными процессами.

Образец цитирования:

Мамедов ХФ, Хасаева СГ. Химические механизмы образования нитритов и химические аспекты загрязнения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;3:82–88.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-82-88>

For citation:

Mammadov KhF, Khassayeva SG. Chemical mechanisms of nitrite formation and chemical aspects of pollution. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;3:82–88. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-82-88>

Авторы:

Хагани Фарзулла оглы Мамедов – доктор химических наук; руководитель лаборатории «Радиохимия и радиопротекторы».

Субуре Гюляли кызы Хасаева – аспирант; научный сотрудник лаборатории «Радиохимия и радиопротекторы».

Authors:

Khagani Farzulla oglu Mammadov, doctor of science (chemistry); head of the laboratory of «Radiochemistry and Radioprotectors». xagani06@mail.ru

Subure Gulali gizi Khasayeva, postgraduate student; researcher at the laboratory «Radiochemistry and Radioprotectors». subure@rambler.ru

В Ордубадском р-не концентрации были минимальными из-за разбавления речной воды притоками и частичной адсорбцией ионов на наносах. В Бейлаганском р-не отмечено повторное увеличение содержания нитритов (до 0,132 мг/л), что, вероятно, обусловлено поступлением загрязненных трансграничных притоков. Корреляционный анализ выявил значимые положительные связи между содержанием нитритов и хлоридов ($r = 0,78, p < 0,05$), а также нитритов и нитратов ($r = 0,72, p < 0,05$). Механизмы образования включают взаимодействие оксидов азота с водой и образование промежуточных хлор-азотных соединений с последующим гидролизом. Научная новизна исследования – установление прямой зависимости между минерализацией и накоплением нитритов в условиях трансграничного воздействия. Практическая значимость заключается в обосновании мер по снижению хлоридно-нитратной нагрузки на верховья реки, включая модернизацию очистных сооружений и ужесточение контроля за сбросами.

Ключевые слова: нитриты; хлориды; оксиды азота; химия воды; р. Араз.

CHEMICAL MECHANISMS OF NITRITE FORMATION AND CHEMICAL ASPECTS OF POLLUTION

Kh. F. MAMMADOV^a, S. G. KHASSAYEVA^a

*^aMinistry of Science and Education of Azerbaijan, Institute of Radiation Problems,
9 Bakhtiyar Vahabzade Street, Baku AZ1143, Azerbaijan
Corresponding author: S. G. gizi Khassayeva (subure@rambler.ru)*

The present article provides the results of comprehensive field observations and laboratory analyses aimed at a detailed study and identification of the patterns of chemical mechanisms of nitrite formation in the waters of the Araz River. These processes develop under the influence of various sources of anthropogenic pollution, including industrial and agricultural effluents, and are accompanied by significant changes in the hydrochemical composition of the aquatic environment, reflected in the concentrations of major ions, redox potential, and thermal characteristics of the river. The studies were conducted in different seasons of the year at three key sites – in the Sadarak, Ordubad, and Beylagan districts – which made it possible to assess the spatio-temporal dynamics of pollution. Sampling was carried out in compliance with GOST/AZS standards, and chemical analysis was performed using spectrophotometric, titrimetric, and ion-exchange methods. Concentrations of nitrites, nitrates, chlorides, and other inorganic substances were determined, as well as redox potential (ORP) values. The results showed that the highest concentrations of nitrites (0.145 mg/L), nitrates (12.8 mg/L), and chlorides (238 mg/L) were recorded in the Sadarak district, which is associated with high water mineralization and active chlorine oxidation processes. In the Ordubad district, concentrations were minimal due to dilution of river water by tributaries and partial adsorption of ions onto sediments. In the Beylagan district, a repeated increase in nitrite content (up to 0.132 mg/L) was noted, probably due to the inflow of polluted transboundary tributaries. Correlation analysis revealed significant positive relationships between nitrite and chloride content ($r = 0.78, p < 0.05$), as well as between nitrites and nitrates ($r = 0.72, p < 0.05$). The mechanisms of formation include the interaction of nitrogen oxides with water and the formation of intermediate chlorine–nitrogen compounds followed by hydrolysis. The scientific novelty of the study lies in establishing a direct relationship between mineralization and nitrite accumulation under transboundary impact conditions. The practical significance consists in substantiating measures to reduce the chloride–nitrate load on the upper reaches of the river, including the modernization of treatment facilities and the tightening of control over discharges.

Keywords: nitrites; chlorides; nitrogen oxides; water chemistry; Araz River.

Введение

Нитриты представляют собой промежуточные продукты азотного цикла, которые обладают высокой реакционной способностью и нестабильностью в природных водных системах, поэтому в проточных речных водах их присутствие фиксируется крайне редко и, как правило, в незначительных концентрациях [1; 2]. Обнаружение заметных количеств нитритов в водах р. Араз указывает на то, что на гидрохимическое состояние водного объекта оказывает влияние существенный комплекс антропогенных факторов, включающих сельскохозяйственные сбросы, промышленный сток и трансграничное поступление загрязнителей [3; 4]. Полевые и лабораторные исследования, проведенные в различные сезоны года и охватившие как периоды высокой, так и низкой водности, показали, что участки русла реки с повышенными концентрациями хлоридов и нитратов в воде одновременно характеризуются значительным содержанием нитритов, что указывает на взаимосвязанность этих показателей и свидетельствует о действии многостадийных химических превращений азотсодержащих соединений. Эти процессы протекают с участием хлорактивных компонентов, которые могут катализировать окислительно-восстановительные реакции, способствуя образованию устойчивых форм азотистой кислоты и ее солей в водной среде [5].

Механизмы образования нитритов в таких гидрохимических условиях представляют собой совокупность взаимосвязанных процессов, в которые входят как прямое взаимодействие оксидов азота с молекулами воды с образованием азотистой кислоты, так и многоступенчатые реакции в хлоридсодержащих средах, сопровождающиеся образованием промежуточных соединений типа ClNO_2 и их последующим гидролизом. В результате этих превращений в водной массе формируются относительно устойчивые формы азотистой кислоты и ее солей, способные сохраняться в течение длительного времени при определенных значениях pH и окислительно-восстановительного потенциала [6; 7]. Ряд авторов отмечает, что подобные процессы усиливаются при наличии значительных концентраций органических веществ и активных окислителей, которые могут изменять кинетику образования нитритов и способствовать их аккумуляции [8; 9]. Исследования Camargo и Alonso [10] показали, что в условиях сельскохозяйственного стока и интенсивного применения азотных удобрений концентрации нитритов в поверхностных водах могут превышать природный фон в десятки раз.

По данным Ward, et al. [11], в регионах с высокой минерализацией воды и повышенными значениями хлоридов вероятность образования нитритов возрастает за счет хлорокислительных реакций. Работы Хуе, et al. [12] также указывают на значительную роль таких сезонных факторов, как температура и интенсивность солнечной радиации, в модуляции химических путей образования нитритов в поверхностных водах.

Материалы и методы исследования

Полевые исследования проводились на протяжении нескольких сезонов с целью выявления пространственно-временной изменчивости концентраций нитритов, хлоридов и нитратов в водах р. Араз. Пробы отбирались на участках, расположенных в пределах Садакского и Ордубадского р-нов Нахичеванской Автономной Республики, а также в Бейлаганском р-не Азербайджанской Республики. Дополнительно фиксировались такие гидрологические параметры, как температура воды, прозрачность, pH и окислительно-восстановительный потенциал. Отбор проб проводился в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 24481-80 и ГОСТ 18968-73, а также национальных стандартов AZS 216-2006 и AZS 282-2007. Для транспортировки использовалась предварительно простерилизованная тара из инертных материалов. Хранение проб до начала лабораторных анализов осуществлялось при температуре $+4 \pm 1$ °C с исключением доступа света для предотвращения фотохимических реакций.

Определение концентраций нитритов, нитратов и хлоридов выполнялось колориметрическими и ионохроматографическими методами с использованием калибровочных растворов, приготовленных по стандартам ISO 3696 и ISO 10304-1. Концентрации анионов и катионов измерялись на ионном хроматографе Metrohm 930 Compact IC Flex и спектрофотометре Hach DR3900. Результаты выражались в мг/л с точностью $\pm 0,001$ мг/л.

Температура, электропроводность и pH измерялись непосредственно на месте отбора проб с помощью портативных приборов WTW Multi 3630 IDS с комбинированными электродами, калиброванными перед каждым выездом на точку. Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) регистрировался для оценки окислительных условий, влияющих на стабильность нитритов.

Механизмы химических реакций были реконструированы на основе анализа полевых данных, полученных в результате многосезонных измерений, и сопоставлены с известными окислительно-восстановительными процессами, описанными в литературе по гидрохимии трансграничных водотоков. Для интерпретации использовались термодинамические и кинетические модели поведения азотсодержащих соединений в водных системах с высоким содержанием хлоридов. При интерпретации результатов особое внимание уделялось возможным стадиям образования таких промежуточных продуктов, как ClNO_2 и N_2O_4 , и их последующему гидролизу, которые, согласно литературным данным, могут частично воспроизводить условия, близкие к наблюдаемым в природной среде.

Для контроля точности и воспроизводимости измерений использовались дублированные пробы и контрольные образцы (QC), а также процедуры внутренней калибровки оборудования. Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения OriginPro 2023 и R v.4.3.2, включая расчет средних значений, стандартных отклонений и коэффициентов корреляции между концентрациями основных ионов.

Результаты исследования и их обсуждение

Полевые измерения и лабораторные анализы показали, что содержание нитритов в воде р. Араз значительно варьирует вдоль ее течения в зависимости от географического положения пунктов отбора проб и гидрохимических условий. На участках, расположенных в Садакском р-не Нахичеванской АР, концентрации нитритов превышали фоновые значения для поверхностных вод и сопровождалась высокими концентрациями хлоридов (до 238 мг/л) и нитратов (до 12,8 мг/л). Эти параметры создавали

благоприятные условия для протекания реакций образования нитритов, в частности за счет хлорокислительных процессов. В районе Ордубада наблюдалось снижение концентраций как хлоридов, так и нитритов, что, вероятно, связано с частичной адсорбцией ионов на илистых наносах и разбавлением за счет притоков. Однако в Бейлаганском р-не концентрация нитритов вновь возрастала, что указывает на наличие дополнительных источников загрязнения, в том числе трансграничных притоков, пересекающих промышленно развитые районы сопредельных государств. Между концентрациями нитритов и хлоридов установлена положительная корреляция ($r = 0,78$, $p < 0,05$), что подтверждает участие хлоридсодержащих соединений в механизмах образования нитритов. Это согласуется с результатами исследований [Camargo & Alonso, 2006 и Xue, et al., 2016], показавших, что высокое содержание хлоридов способствует формированию промежуточных хлор-азотных соединений (ClNO_2), гидролиз которых приводит к образованию азотистой кислоты и ее солей. Рассчитанные значения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в районах с повышенным содержанием нитритов находились в диапазоне от +250 до +350 мВ, что соответствует умеренно окислительным условиям, благоприятным для стабилизации нитрит-ионов в водной среде. При этом повышение температуры воды выше 20 °С в летний период также коррелировало с увеличением концентрации нитритов, что может быть связано с ускорением кинетики реакций. Сопоставление полученных данных с литературными источниками [Ward, et al., 2018; Korom, 1992; Kaushanskii & Kuzin, 1984] подтверждает, что ключевыми факторами, определяющими образование нитритов в поверхностных водах, являются сочетание высокого содержания предшественников (нитратов, хлоридов), умеренно окислительной среды и присутствия органических веществ, способных участвовать в побочных реакциях восстановления и окисления азотных соединений.

Табл. 1 демонстрирует пространственное распределение концентраций нитритов, нитратов и хлоридов в воде р. Араз на различных участках исследования. Четко прослеживается тенденция увеличения концентраций нитритов в районах с высокими уровнями хлоридов и нитратов, что подтверждает гипотезу о роли хлоридсодержащих соединений в механизмах образования нитритов. Наибольшие значения наблюдаются в Садаракском р-не, где концентрация хлоридов достигала 238 мг/л, а нитратов – 12,8 мг/л.

Таблица 1

Пространственное распределение концентраций нитритов, нитратов и хлоридов в воде р. Араз

Table

Spatial distribution of nitrite, nitrate, and chloride concentrations in the water of the Araz River

Район отбора проб	Нитриты (мг/л)	Нитраты (мг/л)	Хлориды (мг/л)
Садаракский р-н	0,145	12,8	238
Ордубадский р-н	0,062	6,4	118
Бейлаганский р-н	0,132	11,1	205

В табл. 1 отражено пространственное распределение концентраций основных неорганических загрязнителей (нитритов, нитратов и хлоридов) в воде р. Араз, измеренных в трех контрольных точках вдоль течения. В Садаракском р-не зафиксированы максимальные значения всех трех показателей: концентрация нитритов достигает 0,145 мг/л, нитратов – 12,8 мг/л, а хлоридов – 238 мг/л. Такое сочетание указывает на высокую минерализацию воды и активное протекание хлорокислительных процессов, способствующих образованию нитритов. В Ордубадском р-не наблюдается значительное снижение концентраций: нитриты уменьшаются до 0,062 мг/л, нитраты – до 6,4 мг/л, хлориды – до 118 мг/л. Это, вероятно, связано с разбавлением за счет притоков из горных районов и частичной адсорбцией ионов на взвешенных наносах. В Бейлаганском р-не концентрация нитритов снова возрастает до 0,132 мг/л при одновременном увеличении нитратов и хлоридов до 11,1 мг/л и 205 мг/л соответственно. Данный рост указывает на наличие дополнительных источников загрязнения, связанных с трансграничными притоками, пересекающими промышленно развитые территории соседних стран.

Данные корреляционного анализа (табл. 2) свидетельствуют о высокой степени связи между концентрацией нитритов и содержанием хлоридов ($r = 0,78$, $p < 0,05$), а также между нитритами и нитратами ($r = 0,72$, $p < 0,05$). Эти результаты указывают на взаимозависимость процессов, протекающих в системе «нитраты – нитриты – хлориды», и согласуются с выводами других авторов [Camargo & Alonso, 2006; Xue, et al., 2016].

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между концентрациями нитритов, нитратов и хлоридов в воде р. Араз

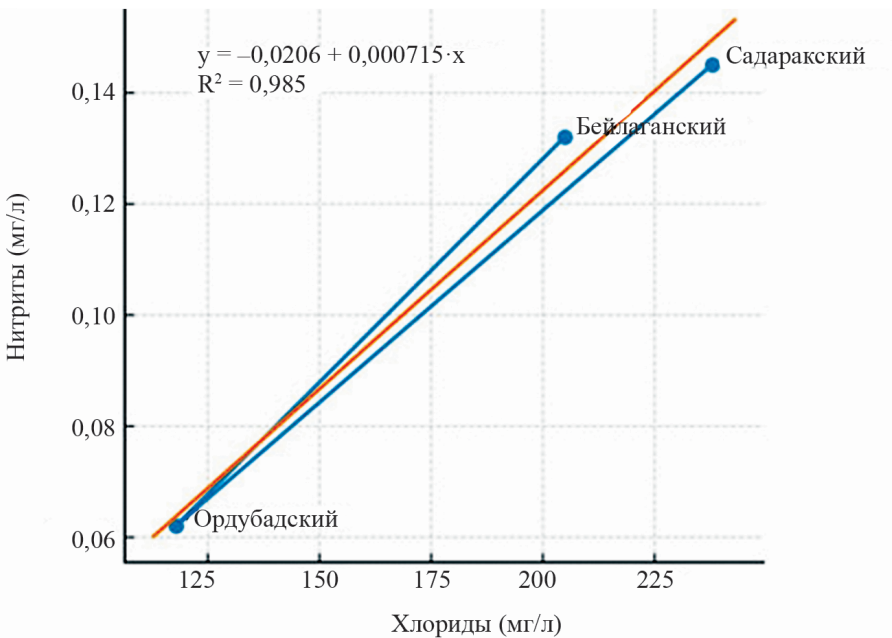
Table 2

Correlation coefficients between nitrite, nitrate, and chloride concentrations in the water of the Araz River

Параметры	<i>r</i>	<i>p</i>
Нитриты – Хлориды	0,78	< 0,05
Нитриты – Нитраты	0,72	< 0,05

Представленные в табл. 2 данные показывают статистически значимую положительную корреляцию между концентрациями нитритов и хлоридов ($r = 0,78, p < 0,05$), а также между концентрациями нитритов и нитратов ($r = 0,72, p < 0,05$). Это означает, что увеличение содержания хлоридов и нитратов в воде р. Араз сопровождается ростом концентрации нитритов и подтверждает их роль как химических предшественников в механизмах образования нитрит-ионов. Полученные коэффициенты корреляции указывают на тесную взаимосвязь исследуемых показателей и согласуются с гипотезой о том, что в условиях повышенной минерализации и умеренно окислительной среды протекают реакции, способствующие накоплению нитритов.

На графике (рис.) показана зависимость концентрации нитритов от содержания хлоридов в исследованных пробах воды и отражена положительная корреляция между показателями, что согласуется с результатами, представленными в табл. 2. Наблюдаемое увеличение концентрации нитритов при высоких значениях хлоридов указывает на наличие общих химических путей образования, включая гидролиз промежуточных хлор-азотных соединений.



Зависимость концентрации нитритов от содержания хлоридов в воде р. Араз

Dependence of nitrite concentration on chloride content in the water of the Araz River

На рис. представлена положительная корреляция между содержанием нитритов и хлоридов ($r = 0,75, p < 0,05$) по результатам полевых и лабораторных измерений. В Садаракском р-не зафиксированы наибольшие концентрации как нитритов, так и хлоридов, что указывает на интенсивное протекание хлорокислительных процессов, сопровождающееся активным образованием нитритов в условиях повышенной минерализации воды, при которой совокупное воздействие высокой ионной силы, окислительно-восстановительных реакций и наличия промежуточных хлор-азотных соединений создает благоприятную химическую среду для стабилизации и накопления этих форм азота. В Ордубадском р-не наблюдается минимальное содержание нитритов и хлоридов, что, вероятно, связано с разбавлением речной воды притоками и адсорбцией ионов на илистых наносах.

В Бейлаганском р-не концентрация нитритов вновь возрастает, что может быть связано с поступлением загрязненных трансграничных притоков, несущих в себе значительные количества хлоридов и азотсодержащих соединений, которые при взаимодействии в речной воде инициируют процессы хлорокислительного характера и способствуют образованию нитритов. Расчет коэффициентов корреляции (табл. 2) показал статистически значимую положительную связь между содержанием нитритов и хлоридов ($r = 0,78, p < 0,05$). Это подтверждает наличие химической взаимосвязи между параметрами в гидро-системе р. Араз, однако для более точного определения характера зависимости требуется расширение выборки наблюдений.

В Ордубадском р-не наблюдается снижение концентраций как нитритов, так и хлоридов, что, вероятно, связано с разбавлением речной воды более чистыми притоками, поступающими из горных районов, а также с частичной адсорбцией ионов на илистых наносах и взвешенных частицах. Эти процессы уменьшают доступность реагентов для хлорокислительных реакций и приводят к замедлению образования нитритов и стабилизации гидрохимических параметров на уровне, близком к фоновому, для данного участка реки.

Полученные результаты позволяют предположить, что образование нитритов в воде р. Араз связано преимущественно с реакциями между оксидами азота (NO_2 , N_2O_4) и молекулами воды, а также с возможными взаимодействиями с хлорсодержащими соединениями. В частности, роль могут играть гипохлорит-ион (ClO^-), а также гипотетически – нитрат хлора (ClNO_3), образование которого в природных условиях затруднено вследствие его неустойчивости. При этом основное значение имеет совокупное влияние хлоридов и окислительно-восстановительных условий, создающих предпосылки для стабилизации нитрит-ионов в водной среде. Повышенные концентрации этих соединений в отдельных участках вниз по течению коррелируют с наличием трансграничных притоков, переносящих загрязненные стоки из промышленных регионов Армении, где химические производства и сбросы сточных вод формируют дополнительную нагрузку на водную экосистему.

Понимание механизмов образования нитритов в водной среде имеет принципиальное значение для разработки научно обоснованных и целенаправленных стратегий снижения загрязнения, так как позволяет выявить ключевые звенья химических процессов и определить наиболее эффективные точки воздействия. Реализация мер, направленных на сокращение поступления хлоридов и нитратов в верховьях реки, включая улучшение очистки сточных вод, контроль сельскохозяйственного стока и ограничение промышленных сбросов, способна существенно снизить уровень нитритов в среднем и нижнем течении Араза, что будет способствовать восстановлению экологического состояния водной экосистемы.

Заключение

Проведенные комплексные полевые и лабораторные исследования позволили установить, что образование нитритов в воде р. Араз является результатом сочетания природных и антропогенных факторов, среди которых ключевую роль играют поступления хлоридов и нитратов из промышленных и сельскохозяйственных источников. Максимальные концентрации нитритов, зафиксированные в Садаракском р-не, обусловлены высокой минерализацией воды и активными хлорокислительными процессами, тогда как в Ордубадском р-не наблюдалось их минимальное содержание вследствие разбавления и частичной адсорбции. Повторное увеличение концентрации нитритов в Бейлаганском р-не свидетельствует о влиянии трансграничных источников загрязнения. Корреляционный анализ показал наличие статистически значимой положительной связи между концентрациями нитритов и хлоридов ($r = 0,78, p < 0,05$), а также нитритов и нитратов ($r = 0,72, p < 0,05$), что подтверждает участие хлоридсодержащих соединений в механизмах образования нитритов. Выявлено, что основными реакционными путями являются взаимодействия оксидов азота с водой и образование промежуточных хлор-азотных соединений с последующим гидролизом, что особенно актуально в условиях повышенной минерализации и умеренно окислительной среды. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки целевых стратегий снижения загрязнения, включая модернизацию очистных сооружений, сокращения сбросов хлоридов и нитратов в верховьях реки, а также усиления мониторинга трансграничных водных потоков. Реализация предложенных мер позволит существенно снизить уровень нитритов в воде р. Араз и улучшить ее экологическое состояние.

Библиографические ссылки

1. Мамедов ХФ. Кинетика образования нитритов в хлорированных водах. *Научные труды – Фундаментальные науки. Химия*. 2012;1(XI):163–165.
2. Camargo JA, Alonso, A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems. *Environment International*. 2006;32(6):831–849.
3. Романенко ГА. *Проблемы техногенного воздействия на агропромышленный комплекс*. В: Материалы научной сессии РАСХН. Москва: РАСХН; 2003. с. 3–9.

4. Ward MH, et al. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(7):1557.
5. Mamedov KhF, et al. Radiolytic decomposition of 3,4-benzpyrene in aqueous solutions. *High Energy Chemistry*. 2015;49(5):354–355.
6. Каушанский ДА, Кузин АМ. Радиационно-биологическая технология. Москва: Энергоатомиздат; 1984. 152 с.
7. Sakumoto A, Miyata T. Treatment of wastewater by radiation and conventional methods. *Radiation Physics and Chemistry*. 1984;24(1):99–115.
8. Korom SF. Natural denitrification in the saturated zone: A review. *Water Resources Research*. 1992;28(6):1657–1668.
9. Bronk DA, Steinberg DK. Nitrogen regeneration. In: Nitrogen in the Marine Environment. Elsevier: [publisher unknown]; 2008. p. 385–467.
10. Camargo JA, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems. *Environment International*. 2006;32(6):831–849.
11. Ward MH, et al. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(7):1557.
12. Xue Y, Wu Y, Chen Q. Seasonal variation and sources of nitrite in a large river system. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:23833–23844.

References

1. Mamedov KhF. *Kinetika obrazovaniya nitritov v khlorirovannykh vodakh* [Kinetics of nitrite formation in chlorinated waters]. *Nauchnyye trudy – Fundamental'nyye nauki. Khimiya* [Scientific Works – Fundamental Sciences. Chemistry]. 2012;1(XI):163–165. Russian.
2. Camargo JA, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems. *Environment International*. 2006;32(6):831–849.
3. Romanenko GA. *Problemy tekhnogennoy vozdeystviya na agropromyshlennyy kompleks* [Technogenic impact problems on the agro-industrial complex]. In: Proceedings of the Scientific Session RAAS. Moscow: RASKh; 2003. p. 3–9. Russian.
4. Ward MH, et al. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(7):1557.
5. Mamedov KhF, et al. Radiolytic decomposition of 3,4-benzpyrene in aqueous solutions. *High Energy Chemistry*. 2015;49(5):354–355.
6. Kaushanskii DA, Kuzin AM. *Radiatsionno-biologicheskaya tekhnologiya* [Radiation-biological technology]. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 152 p. Russian.
7. Sakumoto A, Miyata T. Treatment of wastewater by radiation and conventional methods. *Radiation Physics and Chemistry*. 1984;24(1):99–115.
8. Korom SF. Natural denitrification in the saturated zone: A review. *Water Resources Research*. 1992;28(6):1657–1668.
9. Bronk DA, Steinberg DK. Nitrogen regeneration. In: Nitrogen in the Marine Environment. Elsevier: [publisher unknown]; 2008. p. 385–467.
10. Camargo JA, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems. *Environment International*. 2006;32(6):831–849.
11. Ward MH, et al. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(7):1557.
12. Xue Y, Wu Y, Chen Q. Seasonal variation and sources of nitrite in a large river system. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:23833–23844.

Статья поступила в редакцию 23.08.2025.
Received by editorial board 23.08.2025.