УДК 556.161 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-5-25*

Оригинальная статья/Original paper

Методический подход к идентификации доминирующего способа поступления химических веществ в воду водотоков

Т. С. Папина[1], О. В. Ловцкая[1], И. В. Жерелина[2]

papina@iwep.ru

[1] *Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Барнаул, Россия*

[2] *ООО «Центр инженерных технологий», г. Барнаул, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последние десятилетия, в связи с увеличением антропогенной нагрузки на водосборы, большое внимание уделяется вопросам идентификации и оценки вклада различных источников в загрязнение вод сопряженных с ними водных объектов. В связи с тем, что сведения об объемах и химическом составе сточных вод водопользователей в большинстве случаев неинформативны, а проведение специальных полевых исследований на водосборе связано с большими организационными и финансовыми проблемами, достоверная оценка вклада различных источников в загрязнение водных объектов остается сложной задачей. Поэтому разработка простых методов идентификации и оценки способа поступления химических веществ от природных (в результате обменных процессов между водным потоком и дренируемыми им незагрязненными почвогрунтами) или антропогенных (диффузных и точечных) источников, определяющих качество воды в водотоке, является актуальной задачей. **Методы.** В работе на примере рек бассейна Иртыша предложено решение обратной задачи, а именно – идентификация по результирующему химическому составу воды доминирующего способа поступления химических веществ в водотоки. Методический подход основан на анализе и сопоставлении значений коэффициентов парной корреляции между данными по концентрации и расходу химических веществ и расходу воды в изучаемых створах. **Результаты**. Предложенный подход косвенной оценки доминирующего способа поступления химических веществ в воду рек может рассматриваться как дополнение к традиционному методу определения конкретных источников загрязнения, особенно на предварительной стадии их идентификации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рассредоточенный и сосредоточенный сток, природный фон, концентрация и расход химических веществ, методический подход, реки Иртыш, Ишим, Тобол

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного контракта с Минприроды России на выполнение научно-исследовательской работы от 11.05.2022 № 0173100011322000004 и госзадания Института водных и экологических проблем СО РАН «Формирование гидрохимического стока в системе атмосферные осадки – поверхностные воды на водосборной площади ключевых участков бассейна Оби в зависимости от сезонных природно-климатических условий».

© Папина Т. С., Ловцкая О. В., Жерелина И. В., 2026

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Папина Т. С., Ловцкая О. В., Жерелина И. В. Методический подход к идентификации доминирующего способа поступления химических веществ в воду водотоков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 3. С. 5–25. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-5-25; EDN: XJUIMM

A methodological approach to identifying the dominant pathway for chemicals entering watercourses

Tatyana S. Papina[1] ✉, **Olga V. Lovtskaya**[1], **Irina V. Zherelina**[2]

✉ papina@iwep.ru

[1] *Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia*
[2] *Engineering Technologies Center LLC, Barnaul, Russia*

ABSTRACT

Relevance. In recent decades, due to increasing anthropogenic loads on watersheds, considerable attention has been paid to identifying and assessing the contribution of various sources to water pollution in adjacent water bodies. Since information on the volume and chemical composition of wastewater from water users is generally uninformative, and conducting specialized field studies in the watershed is associated with significant organizational and financial difficulties, reliably assessing the contribution of various sources to water pollution remains a complex task. Therefore, the development of simple methods for identifying and assessing the mode of entry of chemicals from natural (as a result of exchange processes between the water flow and the unpolluted soils it drains) or anthropogenic (diffuse and point) sources that determine water quality in a watercourse is a pressing issue. **Methods.** Using the rivers of the Irtysh River basin as an example, this paper proposes a solution to the inverse problem: namely, identifying the predominant mode of entry of chemicals into watercourses based on the resulting chemical composition of the water. The methodological approach is based on the analysis and comparison of pairwise correlation coefficients between data on chemical concentrations and discharge and water discharge at the studied cross-sections. **Results.** The proposed approach to indirectly assessing the predominant mode of chemical input into river water can be considered as a complement to the traditional approach to identifying specific pollution sources, especially at the preliminary stage of their identification.

KEYWORDS: diffuse and point runoff, natural background, methodological approach, concentration and consumption of chemicals, the Irtysh, Ishim, and Tobol rivers

FINANCING: The work was carried out within the framework of the state contract with the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation for the implementation of scientific research work dated 11.05.2022 No. 017310001132200004 and the state assignment of the Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences «Formation of hydro chemical runoff in the system: atmospheric precipitation – surface water in the catchment area of key sections of the Ob basin depending on seasonal natural and climatic conditions».

FOR CITATION: Papina T. S., Lovtskaya O. V., Zherelina I. V. A methodological approach to identifying the dominant pathway for chemicals entering watercourses. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 3. P. 5–25. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-5-25; EDN: XJUIMM

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия все больше внимания уделяется методам идентификации и оценки вклада различных источников в загрязнение речных вод [1–4]. Это обусловлено тем, что государственная политика, направленная на снижение поступления в водные объекты загрязняющих веществ от точечных (сосредоточенных) источников, несмотря на определенные успехи ее реализации, не принесла ожидаемого эффекта [5]. В проекте Водной стратегии Российской Федерации на период до 2035 года диффузный сток рассматривается как один из серьезных, а в ряде случаев как ключевой источник загрязнения водных объектов, вклад которого в отдельных регионах России оценивается до 50–60 % от суммарного объема поступления загрязняющих веществ в водные объекты[1].

Традиционно при оценке антропогенного воздействия на формирование качества воды поверхностных водных объектов рассматривается вклад конкретных точечных источников (водовыпусков предприятий) и измененных водосборных площадей (урбанизированных, сельскохозяйственных территорий, участков разработки полезных ископаемых и т. п.), расположенных в пределах изучаемых водосборов [1, 6–12]. В связи с тем, что сведения об объемах и химическом составе сточных вод для государственного статистического учета подают водопользователи, а проведение специальных полевых и экспериментальных исследований на водосборе связано с большими организационными и финансовыми проблемами, достоверно оценить вклад различных источников в загрязнение водных объектов достаточно сложно. При этом оценка влияния различных источников на загрязнение водных объектов особенно важна в трансграничных бассейнах, где большую сложность вызывает их идентификация на сопредельных территориях, а вопросы переноса загрязняющих веществ имеют не только экологическое, но и геополитическое значение. В этой связи разработка методов косвенной оценки поступления химических веществ в результате обменных процессов между водным потоком и дренируемыми им почвогрунтами (природный фон), от диффузных и точечных источников (антропогенная составляющая) в формирование качества воды в водотоке является актуальной задачей.

1 Водная стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (проект). URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/proekty_pravovykh_aktov/vodnaya_strategiya_rossiyskoy_federatsii_na_period_do_2035_goda (дата обращения: 10.02.2025).

Если природный химический фон водных объектов условно постоянен и определяется равновесными процессами обмена веществ между водным потоком и дренируемыми им почвогрунтами, то, согласно [2–4], характерные отличительные признаки антропогенных точечных (сосредоточенных) и диффузных (неточечных или рассредоточенных) источников состоят в следующем:

– точечные источники достаточно стабильны: диапазон изменения объема и концентраций сбрасываемых ими веществ не превышает одного порядка. Загрязненность реки от точечных источников не связана или очень слабо связана с изменением метеорологических факторов. Эти источники загрязнения легко идентифицируются;

– диффузные источники загрязнения, как правило, весьма динамичны – диапазон изменения объема и концентраций поступающих от них веществ может составлять несколько порядков, причем эти изменения происходят через произвольные временные интервалы. Нагрузка от них на реку напрямую связана с метеорологическими условиями, особенно с выпадением осадков. Эти источники загрязнения трудно, а порой и невозможно идентифицировать.

Таким образом, в отличие от диффузных источников, «легкую идентификацию» точечных источников загрязнения речного потока можно объяснить существованием резкого и постоянного контраста в изменении качества воды на небольшом участке реки. В то время как сложность идентификации диффузных источников заключается не только в их пространственном распределении на водосборе, но и в опосредованном поступлении загрязняющих веществ в речную воду через контактную среду (например, атмосферных выпадений через грунтовый сток после взаимодействия с почвогрунтами). Среди диффузных источников значимое прямое влияние на качество воды крупных озер и водохранилищ могут оказывать атмосферные выпадения (за счет большой площади водного зеркала) и вторичное загрязнение из донных отложений (например, эмиссия марганца из донных отложений в воду Новосибирского водохранилища [13]). Но так как вклад этих источников в загрязнение речных вод либо невелик (постоянная ротация и промывка донных отложений), либо проявляется опосредованно через сток с водосборной площади (например, атмосферные выпадения), то в дальнейшем в нашей работе эти источники не рассматриваются.

Кроме идентификации источников загрязнения, для обоснования и организации мероприятий по улучшению качества поверхностных вод особое значение имеет оценка вклада того или иного источника в общее загрязнение речного потока [1]. Вклад сосредоточенных источников можно легко рассчитать на основе разницы в значениях концентраций определяемых химических веществ в воде фонового створа, расположенного выше выпуска сточных вод, и створа полного смешения, расположенного в максимальной близости вниз по

течению от выпуска сточных вод[2]. Органы государственной власти для определения размера вреда, причиненного водному объекту в результате сброса сточных вод, применяют методику, утвержденную Минприроды России[3], которая основана на формальных индексах и таксах и, на наш взгляд, не отражает реального размера вреда водному объекту, т. к. не учитывает фактическую ситуацию на водном объекте после сброса сточных вод. Для количественной оценки влияния и вклада диффузного стока в загрязнение поверхностных вод используют различного уровня оценки и модельные расчеты [6, 10, 11, 14–17].

В связи с постоянным развитием технологий водоочистки можно предположить, что с начала индустриального периода соотношение вклада точечных и диффузных источников в общее загрязнение водных объектов постоянно менялось, особенно в пределах урбанизированных территорий. В последнее время за счет существенного увеличения объектов накопленного экологического вреда на участках водосбора (в первую очередь это городские свалки и складированные промышленные и сельскохозяйственные отходы) увеличиваются как объемы, так и номенклатура поступающих в водные объекты загрязняющих веществ [8, 9, 18]. В этой связи большинство исследователей в России именно с диффузным загрязнением связывают отсутствие кардинального улучшения состояния водных объектов после значительного сокращения поступления загрязняющих веществ в составе сточных вод предприятий [7, 12, 19].

В представленной работе на примере рек бассейна Иртыша предложено решение обратной задачи: обоснован методический подход, позволяющий по изменению химического состава речной воды идентифицировать доминирующий способ поступления химических веществ в водотоки. Методика базируется на использовании данных государственной сети мониторинга (о качестве и расходе воды) и анализе значений коэффициентов парной корреляции между концентрациями химических веществ, их массовым расходом и расходом воды в исследуемых створах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Иртыш и ее два основных притока Ишим и Тобол являются крупнейшими трансграничными реками России. Бассейн Иртыша площадью 1,13 млн км^2 простирается с северо-запада на юго-восток, от гор Алтая и степей Казахстана до заболоченных низменностей Западно-Сибирской равнины более чем на 2,2 тыс. км. Бассейн р. Тобол является наиболее залесенным (более 50 %), однако в верхнем течении до границы Казахстана и России река течет

2 ISO 5667-6-2014. Качество воды. Отбор проб. Часть 6. Руководство по отбору проб из рек и потоков. URL: https://en.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5397359 (дата обращения: 14.02.2025).

3 Приказ Минприроды России от 13.04.2009 № 87 (ред. от 26.08.2015) «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства» (зарегистрировано в Минюсте России 25.05.2009 № 13989).

по засушливым степным районам Казахстана (рисунок). В бассейне Ишима наибольшие площади (около 63 %) занимают степи. Доля лесопокрытых земель в бассейне Иртыша (без Черного Иртыша) составляет более 48 %.

Неравномерно и хозяйственное использование водосборной площади изучаемых рек. В Китае на водосборе р. Черный Иртыш развиты нефтедобывающая промышленность и орошаемое земледелие, сопровождающиеся значительным забором воды (по экспертным оценкам, более 50 % условно-естественного стока реки). В Казахстане сток Иртыша, Ишима и Тобола зарегулирован каскадами водохранилищ, а водосборная площадь изменена горной добычей. Здесь расположены крупные населенные пункты, предприятия горно-металлургического профиля, химической промышленности и машиностроения, развито орошаемое земледелие. На российской части водосборного бассейна большинство населенных пунктов и промышленных предприятий расположены в бассейне Тобола и приурочены к восточному склону Урала, аграрная специализация характерна только для приграничных районов.

Известно, что загрязненность реки от диффузных источников происходит за счет смыва с водосбора во время выпадения осадков, которые, в свою очередь, влияют на увеличение расхода воды в замыкающем створе, в то время как загрязнение от точечных источников, как правило, не связано или очень слабо



Рисунок. Картосхема района исследования

Figure. Schematic map of the study region

связано с осадками [2–4]. Таким образом, анализ корреляционных связей между концентрацией химических веществ и расходом воды в замыкающем створе может косвенно указывать на характер источника поступления этих веществ, а связь между массовым расходом химических веществ, который характеризует совместное влияние изучаемых факторов, с концентрацией веществ и расходом воды позволяет вычленить доминирующий фактор этого влияния.

Для оценки корреляционных связей между концентрацией загрязняющего вещества, его массовым расходом и расходом воды в створах изучаемых рек использовали ряды данных государственной наблюдательной сети Росгидромета. В качестве исходной информации – суточные значения концентраций химических веществ и гидрохимических показателей, а также расходов воды за 2012 г. (маловодный с вероятностью превышения 85 %), 2014 г. (средней водности с вероятностью превышения 40 %) и 2016 г. (многоводный с вероятностью превышения 5 %). Характерные периоды выбраны на основе статистического анализа ряда данных среднегодовых расходов воды последнего гидрологического цикла (1950–2020 гг.), определенного по посту р. Иртыш – г. Тобольск с длинным рядом наблюдений, и позволяют охватить все возможные сценарии стока веществ с изучаемого водосбора.

Расчеты выполнены в четырех створах: р. Иртыш – с. Татарка и р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск (воды низкой минерализации); р. Ишим – с. Ильинка и р. Тобол – с. Звериноголовское (воды повышенной минерализации). Среди выбранных створов три являются трансграничными, один – замыкающим в речной системе Иртыша (рисунок). В табл. 1 приведены сведения о гидрологических постах и пунктах контроля качества воды (гидрохимических пунктах) для этих четырех створов.

Данные по расходам воды на дату отбора проб в изучаемых створах получены из АИС ГВМО[4]. В связи с тем, что в исходных гидрохимических данных в каждой точке отбора за конкретную дату приведено только одно значение концентрации для каждого анализируемого показателя, для дальнейших исследований и расчета массового расхода это значение условно принималось за среднюю концентрацию вещества по сечению реки с погрешностью, равной нулю.

Таблица 1. Створы наблюдений
Table 1. Observation ranges

Наименование створа / поста / пункта	Гидрологический пост		Гидрохимический пункт	
	код поста	расстояние от устья, км	координатный номер вертикали	расстояние от устья, км
р. Иртыш – с. Татарка	11634	2022	35007500	2022
р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск	11061	20	605006905	16,6
р. Ишим – с. Ильинка	11411	658	553006911	660,75
р. Тобол – с. Звериноголовское	12010	898	42006440	898

4 Электр. ресурс. URL: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения: 1.02.2025).

Перед началом работы была проведена верификация исходных данных, включающая следующие этапы: для расчетов коэффициентов парной корреляции выбирали ряды, содержащие не менее 20 значений; для значений ниже предела определения, обозначенных в предоставленных Росгидрометом данных как аналитический ноль (т. е. ниже предела определения используемого инструментального метода анализа), это значение заменяли на ½ предела определения данного показателя по методике анализа, входящей в Федеральный перечень методик, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей среды[5]; не использовали ряды данных, где большинство определяемых значений было ниже аналитического ноля.

Расчет массового расхода веществ через сечение створа проводили по формуле:

$$M_{ig} = C_{ig} Q_g, \quad (1)$$

где M_{ig} – расход i-го вещества через сечение g-го створа, г/с;

C_{ig} – концентрация i-го вещества в g-м створе, г/м^3;

Q_g – расход воды в g-м створе на момент отбора пробы, м^3/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2–5 представлены результаты расчета средних, медианных, максимальных и минимальных значений концентраций и расходов веществ в створах р. Иртыш – с. Татарка, р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск, р. Ишим – с. Ильинка, р. Тобол – с. Звериноголовское за три года (2012, 2014, 2016). В таблицах для каждого створа дополнительно приведены отношения максимальных и минимальных значений концентраций и расходов веществ, а также коэффициенты парной корреляции Пирсона между следующими рядами данных: концентрация вещества – расход воды, массовый расход вещества – расход воды, концентрация вещества – массовый расход вещества. Для дальнейшего анализа использовали только коэффициенты корреляции, достоверные по критерию Стьюдента с вероятностью ошибки $\alpha < 0{,}05$.

Результаты расчетов показывают, что по шкале градации силы связи (табл. 6) [20] умеренная положительная связь ($r = 0{,}3 – 0{,}5$) наблюдается между значениями концентраций и расходом воды для взвешенных веществ (ВВ) и фосфатов (PO_4^{3-}) в створе р. Иртыш – с. Татарка (табл. 2); ВВ, органических веществ, определяемых по химическому потреблению кислорода (далее ХПК), и нефтепродуктов в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск (табл. 3); Fe в створе р. Ишим – с. Ильинка (табл. 4); значительная положительная связь

5 РД 52.18.595-96. Руководящий документ. Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей среды (утв. Госстандартом России 20.12.1996, Росгидрометом 15.12.1996) (ред. от 12.12.2022).

Таблица 2. Средние, медианные, максимальные (max) и минимальные (min) значения концентраций и расходов веществ в течение трех лет (2012, 2014, 2016 гг.) в створе р. Иртыш – с. Татарка. Изменение расхода воды в створе 210–2830 м³/с (среднее значение 911 м³/с; медиана 680 м³/с; max/min = 13,5)

Table 2. Average, median, maximal (max) and minimal (min) values of substances concentrations and discharge rates over three years (2012, 2014, and 2016) in the Irtysh River – the village of Tatarka range. The change of water consumption in the range is 210–2830 m³/s (average value is 911 m³/s; median is 680 m³/s; max/min = 13.5)

Показатель / n	ВВ	ХПК	$БПК_5$	Минерализация	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Fe,	Zn	Cu	Mn	NO_3^-	PO_4^{3-}
	108	111	108	108	108	108	108	108	108	111	111	111	111	108	109
Концентрация, г/м³ Массовый расход, г/с															
Среднее значение	34,5	15,4	1,72	179	24,2	8,9	7,1	27	100	0,074	0,0071	0,0028	0,0035	0,148	0,013
	36 864	13 603	1511	15 8408	21 678	7436	6362	24508	87 798	70	6,1	2,6	3,2	115	13,0
Медиана	21,0	14,2	1,60	182	24,7	8,1	7,1	28	101	0,050	0,0058	0,0027	0,0021	0,107	0,012
	19 749	9860	1273	11 9625	16 705	6183	4650	18 445	67 736	40	3,8	2,0	1,6	80	7,9
Max	296,0	92,4	3,80	218	32,5	34,5	12,4	40	122	0,402	0,0621	0,0060	0,0228	0,583	0,048
	488 400	96 356	5125	565 434	77 542	27 985	28 017	99 647	299 980	683	46,2	9,9	29,2	735	106,1
Min	0,5	4,3	0,25	122	6,8	2,7	4,6	12	71	0,005	0,0005	0,0016	0,0005	0,003	0,002
	233	3063	133	42 693	2666	2767	1407	5076	24 570	2,6	0,3	0,53	0,1	2	1,3
Max/min	592	21	15	2	5	13	3	3	2	80	124	4	46	194	24
	2096	31	38	13	29	10	20	20	12	263	136	19	278	337	84
Коэффициент корреляции Пирсона (r)															
C и Q	**0,30**	−0,09	−0,04	0,00	0,11	**−0,24**	0,17	0,08	−0,11	0,09	−0,09	−0,05	−0,02	**−0,13**	**0,31**
M и Q	**0,47**	**0,65**	**0,77**	**0,98**	**0,96**	**0,79**	**0,91**	**0,93**	**0,98**	**0,51**	**0,39**	**0,92**	**0,42**	**0,29**	**0,74**
M и C	**0,94**	**0,61**	**0,54**	0,19	**0,35**	**0,30**	**0,51**	**0,39**	0,06	**0,79**	**0,76**	**0,31**	**0,81**	**0,76**	**0,78**

Примечание: здесь и далее в табл. 3–5: C – концентрация, M – массовый расход, Q – расход воды в створе, n – количество определений показателя (количество данных в выборке). Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции (уровень значимости $\alpha < 0,05$).

Таблица 3. Средние, медианные, максимальные (max) и минимальные (min) значения концентраций и расходов веществ в течение трех лет (2012, 2014, 2016) в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск.
Изменение расхода воды в створе 845–8990 м³/с (среднее значение 3091 м³/с; медиана 1970 м³/с; max/min = 11)

Table 3. Average, median, maximal (max) and minimal (min) values of substances concentrations and discharge rates over three years (2012, 2014, and 2016) in the Irtysh River – the city of Khanty-Mansysk range. The change of water consumption in the range is 845–8999 m³/s (average value is 3091 m³/s; median is 1970 m³/s; max/min = 11)

Показатель / n	ВВ	ХПК	$БПК_5$	Нефтепродукты	Минерализация	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Fe	Zn	Cu	Mn	NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{3-}
n	36	36	36	36	22	22	22	22	22	22	36	32	32	32	36	36	22
Концентрация, г/м³ Массовый расход, г/с																	
Среднее значение	15,0	35,8	1,26	0,044	198	24,0	10,0	15,9	15,7	114	1,37	0,0230	0,0053	0,079	0,36	0,209	0,061
	56 626	122 850	3488	192	700 909	83 240	32 581	58 172	57 168	385 950	3715	83,55	17,1	182	1318	336	159
Медиана	11,4	37,2	0,79	0,031	172	20,8	8,8	15,9	15,6	95	1,39	0,0172	0,0038	0,060	0,20	0,102	0,030
	22 608	71 086	2101	64	443 531	58 682	24 960	45 579	36 464	246 036	2703	46,60	12,0	140	401	276	133
Max	60,4	81,6	9,75	0,381	420	44,1	25,8	25,0	32,3	244	2,88	0,0987	0,0180	0,268	1,55	0,772	0,560
	324 324	449 500	21 255	2633	2 357 322	242 801	98 231	160 312	156 426	1 368 279	10 810	648,50	75,7	704	11672	1469	473
Min	1,2	4,4	0,30	0,010	71	7,6	4,86	6,9	6,2	30,51	0,36	0,0004	0,0021	0,012	0,03	0,004	0,009
	1451	3960	423	12	130 832	19 476	10 682	16 178	11 969	56 444	324	0,64	2,5	44	59	9	17
Max/min	49	19	33	38	6	6	5	4	5	8	8	260	9	21	52	154	62
	224	114	50	219	18	12	9	10	13	24	33	1016	30	16	197	159	28
Коэффициент корреляции Пирсона (r)																	
C и Q	**0,35**	**0,40**	−0,11	**0,38**	**−0,36**	**−0,43**	**−0,50**	**−0,33**	−0,27	**−0,41**	−0,32	0,13	−0,04	**−0,50**	0,23	**−0,59**	−0,27
M и Q	**0,75**	**0,60**	**0,49**	**0,54**	**0,76**	**0,82**	**0,78**	**0,89**	**0,90**	**0,71**	**0,67**	**0,57**	**0,70**	**0,51**	**0,64**	−0,18	**0,49**
M и C	**0,80**	**0,90**	**0,79**	**0,98**	0,25	0,06	−0,02	0,07	0,10	0,24	0,30	**0,73**	**0,55**	**0,38**	**0,76**	**0,67**	**0,57**

Таблица 4. Средние, медианные, максимальные (max) и минимальные (min) значения концентраций и расходов веществ в течение трех лет (2012, 2014, 2016) в створе р. Ишим – с. Ильинка. Изменение расхода воды в створе 9–612 м³/с (среднее значение 84 м³/с; медиана 20 м³/с; max/min = 68)

Table 4. Average, median, maximal (max) and minimal (min) values of substances concentrations and discharge rates over three years (2012, 2014, and 2016) in the Ishym River – the village of Ilyinka range. The change of water consumption in the range is 9–612 m³/s (average value is 84 m³/s; median is 20 m³/s; max/min = 68)

Показатель / n	ВВ	ХПК	$БПК_5$	Нефтепродукты	Минерализация	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Fe	Zn	Cu	Mn	NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{3-}
	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Концентрация, г/м³ Массовый расход, г/с																	
Среднее значение	16,3	22	2,3	0,056	694	70,2	26,9	152	103	230	0,08	0,0025	0,0026	0,041	0,146	0,147	0,029
	2796	2029	218	3,4	42 037	4507	1602	8401	6244	14 918	11,9	0,222	0,251	2,10	16,68	10,88	2,33
Медиана	12,0	21	1,9	0,040	700	72,5	26,5	149	97	234	0,07	0,0025	0,0024	0,027	0,099	0,074	0,022
	268	445	59	0,9	15 192	1542	597	3425	2154	5171	1,6	0,051	0,065	0,94	1,78	2,27	0,54
Max	64,0	36	7,1	0,410	1190	105	46,7	275	182	367	0,33	0,0065	0,0048	0,2064	0,770	0,636	0,149
	39 168	19 584	2693	19,5	330 847	37 760	12 179	61 812	45 839	126 256	202,0	1,8972	2,387	14,93	257,04	179,93	18,36
Min	0,5	10,9	0,8	0,005	351	39,3	13,4	66	51	98	0,03	0,0006	0,0014	0,007	0,005	0,004	0,005
	4,3	153,6	7,3	0,1	7822	779	232	1751	1059	1688	0,3	0,005	0,014	0,11	0,056	0,06	0,04
Max/min	128	3	8	82	3	3	3	4	4	4	11	11	3	28	154	159	30
	9025	127	369	174	42	48	53	35	43	75	601	364	172	135	4590	2999	423
Коэффициент корреляции Пирсона (r)																	
C и Q	**0,70**	0,19	0,10	−0,12	**−0,57**	**−0,56**	**−0,53**	**−0,55**	**−0,51**	**−0,49**	**0,49**	0,06	0,29	−0,20	0,10	−0,06	−0,02
M и Q	**0,76**	**0,74**	**0,73**	**0,60**	**0,65**	**0,63**	**0,66**	**0,66**	**0,68**	**0,63**	**0,69**	**0,74**	**0,74**	**0,63**	**0,67**	**0,68**	**0,74**
M и C	**0,76**	0,30	0,25	0,21	**−0,50**	**−0,48**	**−0,47**	**−0,49**	**−0,43**	**−0,40**	**0,75**	0,21	**0,37**	0,12	**0,42**	0,29	0,27

Таблица 5. Средние, медианные, максимальные (max) и минимальные (min) значения концентраций и расходов веществ в течение трех лет (2012, 2014, 2016) в створе р. Тобол – с. Звериноголовское. Изменение расход воды в створе 5,2–1150 м³/с (среднее значение 92,5 м³/с; медиана 26,6 м³/с; max/min = 221)

Table 5. Average, median, maximal (max) and minimal (min) values of substances concentrations and discharge rates over three years (2012, 2014, and 2016) in the Tobol River – the village of Zverinogolovskoye range. The change of water consumption in the range is 5.2–1150 m³/s (average value is 92.5 m³/s; median is 26.6 m³/s; max/min = 221)

Показатель / n	ВВ	ХПК	Нефтепродукты	Минерализация	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Fe	Zn	Cu	Mn	NH_4^+	NO_3^-
	38	39	39	38	38	38	38	38	38	39	38	38	39	39	39
Концентрация, г/м³ Массовый расход, г/с															
Среднее значение	16,1	23,0	0,078	868	69	35	166	220	227	0,21	0,0118	0,0046	0,240	0,27	1,450
	2386	2174	4,3	112 110	7454	4614	24 650	25 906	26 199	27,4	0,845	0,600	8,10	21,1	87,4
Медиана	9,4	20,0	0,060	900	65	35	173	224	199	0,16	0,0085	0,0041	0,122	0,21	1,090
	133	577	1,4	28 757	2189	985	5160	6912	7977	3,2	0,221	0,076	3,15	4,8	31,3
Max	170,8	51,0	0,460	1604	158	89	347	470	549	0,69	0,0508	0,0132	1,500	1,60	7,560
	50 140	21 385	34,5	555 450	34 615	20 930	128 225	139 150	106 260	339,1	9,200	12,075	71,54	264,5	931,5
Min	0,4	4,0	0,003	342	23	7	16	64	92	0,04	0,0005	0,0007	0,007	0,01	0,005
	7	56	0,1	11 003	834	279	567	2219	3365	0,8	0,014	0,013	0,61	0,4	0,1
Max/min	427	13	153	5	7	13	22	7	6	16	102	19	214	160	1512
	7540	379	453	50	42	75	226	63	32	411	684	938	117	665	8788
Коэффициент корреляции Пирсона (r)															
C и Q	0,15	0,02	−0,17	**−0,36**	**−0,47**	−0,26	−0,16	**−0,39**	**−0,44**	0,25	−0,12	0,24	−0,20	−0,07	−0,14
M и Q	**0,91**	**0,73**	**0,88**	**0,94**	**0,96**	**0,92**	**0,91**	**0,96**	**0,92**	**0,84**	**0,93**	**0,93**	**0,62**	**0,92**	**0,89**
M и C	0,29	**0,39**	0,06	−0,25	**−0,45**	−0,14	0,04	−0,30	**−0,39**	**0,55**	0,13	**0,35**	0,03	0,17	0,14

(r = 0,5 – 0,7) наблюдалась только для взвешенных веществ в створе р. Ишим – с. Ильинка (табл. 4). При этом в створе р. Тобол – с. Звериноголовское достоверных положительных связей между значениями концентраций изучаемых веществ и расходом воды не выявлено (табл. 5).

Таблица 6. Качественная оценка силы корреляционной связи по результатам расчета коэффициентов корреляции Пирсона (r) [20]

Table 6. Qualitative assessment of the correlation strength according to the outcomes the Pearson correlation (r) coefficients calculation [20]

Коэффициент корреляции / Correlation	Сила связи / Strength of association
0,15–0,3	Слабая/weak
0,3–0,5	Умеренная/moderate
0,5–0,7	Значительная/significant
0,7–0,9	Сильная/strong
0,9–0,99	Очень сильная / very strong

Согласно признакам диффузных источников [2–4] логично предположить, что если существует положительная корреляционная зависимость между величинами концентраций какого-либо вещества и расходами воды в створе на момент отбора пробы, то поступление этого вещества в речную сеть выше данного створа может быть связано с его смывом с водосборной площади. Действительно, исходная (назовем ее условно фоновой) концентрация будет увеличиваться для тех химических веществ, которые дополнительно поступили в водоток в составе боковой приточности, объем которой напрямую влияет на увеличение расхода воды в створе. Здесь следует отметить, что заметное увеличение концентрации конкретного вещества в водотоке будет наблюдаться только тогда, когда исходная условно фоновая концентрация этого вещества в водотоке будет достоверно ниже его концентрации в водном потоке, поступающем в речную сеть с поверхности водосбора и из почвенно-грунтового горизонта (далее – рассредоточенный водный сток). При этом объем рассредоточенного водного стока должен быть таковым, чтобы при его смешении с речным потоком концентрация вещества в створе реки статистически значимо превышала условно фоновую концентрацию. По нашим данным, умеренная и значительная положительная корреляционная связь между величиной концентрации и расходом воды наблюдалась для взвешенных веществ в трех из четырех изучаемых створов (табл. 2–5), а для фосфатов, ХПК, Fe и нефтепродуктов – в одном из трех створов (табл. 2–4). Исходя из этого, можно предположить, что ВВ, фосфаты, ХПК, Fe и нефтепродукты поступают в русло реки выше створов наблюдения преимущественно с поверхности водосбора в составе рассредоточенного водного стока.

Данные табл. 2–4 также показывают, что для химических веществ, поступивших в реку преимущественно в составе рассредоточенного водного стока, в подавляющем большинстве случаев сильная и очень сильная корреляционная связь массового расхода вещества наблюдается как с концентрацией этого вещества, так и с расходом воды в створе, а отношение max/min концентрации вещества в створе выше 10. Это означает, что изменение величины массового расхода данного химического вещества или гидрохимического показателя в равной степени определяется как изменением величины расхода воды в створе, так и изменением концентрации этого вещества/показателя при его дополнительном поступлении с площади водосбора. Отметим, что при значительном варьировании расхода воды в створе (например, р. Тобол – с. Звериноголовское, табл. 5), изменение массового расхода химических веществ, поступивших от разных источников, будет иметь сильную и очень сильную положительную корреляционную связь с расходом воды, на фоне которой трудно вычленить доминирующую составляющую поступления химических веществ в речной поток.

При обратной корреляционной зависимости между значениями концентраций и расходом воды влияние рассредоточенного водного стока на исходную концентрацию веществ в речном потоке можно рассматривать как эффект разбавления. В изучаемых створах умеренная и значительная отрицательная корреляционная зависимость между значениями концентраций и расходом воды наблюдалась для минерализации и ее основных составляющих в створах р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск, р. Ишим – с. Ильинка и р. Тобол – с. Звериноголовское. Это указывает на разбавляющую роль склонового стока для минеральной составляющей вод рек Ишим и Тобол (воды повышенной минерализации за счет разгрузки высокоминерализованного подземного стока), после поступления которого разбавляющий эффект продолжает сказываться и на составе воды в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск. Для створа р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск умеренная отрицательная корреляционная связь получена также для Fe и Mn, а значительная – для нитратов. Если дополнительно наблюдается статистически значимая отрицательная корреляционная связь между массовым расходом вещества и его концентрацией в створе, можно говорить о разбавлении постоянного присутствующего химического фона. В нашем случае таким химическим фоном являются составляющие минерального состава воды в створах р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск, р. Ишим – с. Ильинка и р. Тобол – с. Звериноголовское. Положительные корреляционные зависимости между массовым расходом этих веществ и расходом воды в створах показывают, что с водосбора все же поступает дополнительное количество минеральных веществ, однако их концентрации в рассредоточенном водном стоке заметно ниже, чем в исходном речном потоке. Поэтому отношение max/min концентрации вещества в этих створах незначительное.

Поступление химических веществ в речной водный поток от точечных источников (сточные воды промышленных предприятий и коммунальных служб) чаще всего не связано с изменением метеорологических факторов. Поэтому, если источник постоянный, а с водосбора не будет дополнительного поступления химических веществ, то должна наблюдаться отрицательная значимая корреляционная связь между концентраций вещества и расходом воды в створе, т. к. в данном случае объем водного стока с водосбора будет определять уровень разбавления исходной концентрации поступивших от точечного источника веществ. При этом изменение массового расхода вещества в створе в первую очередь будет зависеть от изменения величины его концентрации и слабо зависеть от расхода воды. Такая ситуация наблюдалась в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск для нитратов и фосфатов (табл. 3). Если предположить существование дополнительных источников поступления марганца и железа с водосбора выше данного створа (аналогично минеральной составляющей), то преимущественное поступление этих металлов также можно отнести к сосредоточенным источникам.

Значения природных фоновых концентраций веществ в речном потоке определяются равновесными обменными процессами между водным потоком и дренируемыми им почвогрунтами и по определению не должны зависеть от расхода воды в створе. При этом массовый расход этих веществ в первую очередь должен определяться изменением расхода воды в створе, а не изменением значений концентраций, а диапазон варьирования концентраций веществ должен быть минимальным. Под эти условия в нашем случае подходит весь минеральный состав (за исключением Mg) и Cu в створе р. Иртыш – с. Татарка, а также Cu, ХПК и $БПК_5$ в створе р. Ишим – с. Ильинка.

Сравнение средних и медианных значений концентраций и массовых расходов веществ также может дать дополнительную информацию, характеризующую способ поступления химических веществ в речной водный поток. В нашем исследовании медианные и средние значения концентраций для веществ природного фона были близки между собой, для веществ сосредоточенного водного стока незначительно разнились, а для рассредоточенного стока средние и медианные значения концентраций отличались существенно.

На основании вышесказанного можно сформулировать основные отличительные признаки (табл. 7), позволяющие идентифицировать доминирующий способ поступления химических веществ в воду водотоков.

Чтобы на практике использовать приведенную в табл. 7 информацию по идентификации источников поступления химических веществ в водотоки, необходимо предварительно выполнить следующие действия:

Провести верификацию исходных данных (исключить из рассмотрения явно некондиционные данные), а для концентраций ниже предела определе-

Таблица 7. Основные признаки, позволяющие классифицировать способ поступления химических веществ в водотоки

Table 7. Main features enabling to classify the way of chemical substances input into watercourses

Рассредоточенный сток	Сосредоточенный сток	Природный фон
Положительная статистически значимая корреляционная связь между концентрацией вещества и расходом воды в створе	Отрицательная статистически значимая корреляционная связь между значениями концентраций вещества и расходом воды в створе	Отсутствие статистически значимой корреляционной связи между концентрацией вещества и расходом воды в створе
Расход вещества через сечение створа в равной степени зависит как от концентрации вещества, так и от расхода воды в створе	Расход вещества через сечение створа в первую очередь зависит от изменения концентрации вещества в створе.	Расход вещества через сечение створа в первую очередь зависит от расхода воды в створе
Диапазон изменения концентрации вещества от одного до нескольких порядков	Диапазон изменения концентрации вещества в пределах одного порядка	Очень узкий диапазон изменения концентрации вещества в створе
Среднее и медианное значения концентрации вещества значительно разнятся между собой	Среднее и медианное значения концентрации вещества незначительно разнятся между собой	Среднее и медианное значения концентрации вещества близки между собой

ния метода (аналитический ноль) использовать значение ½ предела определения данного показателя.

По формуле (1) рассчитать массовый расход веществ через сечение изучаемого створа.

Рассчитать средние, медианные, максимальные и минимальные значения рядов данных по концентрациям и расходам веществ в створе.

Рассчитать коэффициенты парной корреляции между следующими рядами данных: концентрация вещества – расход воды, расход вещества – расход воды, концентрация вещества – расход вещества.

С помощью результатов расчетов и информации, приведенной в табл. 7, выполнить идентификацию доминирующего способа поступления веществ с территории водосбора в русло реки выше изучаемого створа.

В заключение следует отметить существующие ограничения для использования представленного в данной работе методического подхода. Достоверные корреляционные зависимости между рядами данных являются необходимым, но недостаточным условием для утверждения о взаимозависимости этих рядов, поэтому предложенный методический подход следует рассматривать как начальный этап для последующей идентификации конкретных источников

поступления загрязняющих веществ в воду водотоков. Иными словами, его следует рассматривать как важную информацию, позволяющую определить конкретные источники загрязнения воды водотоков.

С помощью предложенного методического подхода можно идентифицировать только доминирующий способ поступления химического вещества в речной сток, поэтому одновременно присутствующие значимые, но близкие по объему потоки рассредоточенного, сосредоточенного и природного стоков с помощью этого подхода идентифицировать невозможно. Данный подход нельзя использовать для водотоков зарегулированного стока (водохранилищ и прудов) и водоемов, а также для равнинных участков рек теплого климата, в которых, например, концентрации биогенных веществ будут в первую очередь определяться внутриводоемными процессами.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенной работы предложен новый методический подход к идентификации доминирующего способа поступления химических веществ (рассредоточенный или сосредоточенный сток, природный фон) в воду водотоков, опробованный на примере р. Иртыш и ее притоков. В качестве исходной информации для идентификации доминирующего способа поступления использованы ряды данных по концентрации и расходу изучаемых веществ и расходу воды в створе реки на момент отбора пробы, а также коэффициенты парной корреляции Пирсона между концентрацией вещества и расходом воды, расходом вещества и расходом воды, концентрацией вещества и расходом вещества.

Обосновано, что анализ корреляционных связей между концентрацией химических веществ и расходом воды в створе может косвенно указывать на характер источника поступления этих веществ с водосбора, а связь между массовым расходом химических веществ, который характеризует совместное влияние изучаемых факторов, с концентрацией веществ и расходом воды позволяет вычленить доминирующий фактор этого влияния. В частности, показано, что основным признаком поступления химических веществ в реку от рассредоточенных источников может являться существование положительной корреляционной связи между концентрацией загрязнителя и расходом воды в створе, а также зависимость изменения расхода загрязнителя через сечение створа как от изменения величины концентрации вещества, так и от расхода воды. В отличие от рассредоточенных источников, поступление загрязняющих веществ от сосредоточенных источников характеризуется отрицательной корреляционной связью между концентрацией загрязнителя и расходом воды в створе, а также тем, что на изменение массового расхода загрязнителя через сечение створа в первую очередь влияет изменение величины концентрации

вещества в створе. Химические вещества природного фона характеризуются отсутствием значимой корреляционной связи между концентрацией загрязнителя и расходом воды, а массовый расход этих веществ зависит от расхода воды в створе.

Прямая оценка вклада различных источников в загрязнение водных объектов является сложной задачей, прежде всего, из-за отсутствия достоверных сведений об объемах и химическом составе сточных вод водопользователей. Предложенный авторами статьи методический подход оценки доминирующего способа поступления химических веществ в воду рек позволяет решать обратную задачу: по результирующему химическому составу речного стока идентифицировать способ поступления химических веществ от природных (в результате обменных процессов между водным потоком и дренируемыми им незагрязненными почвогрунтами) или антропогенных (диффузных и точечных) источников, определяющих качество воды в водотоке. Опробованный на примере р. Иртыш и ее притоков методический подход может быть в будущем использован для оценки поступления загрязняющих веществ на водосборах других рек умеренного климата, в которых вклад внутриводоемных процессов в химический сток веществ не является значимым.

Предложенный методический подход косвенной оценки доминирующего способа поступления химических веществ в воду рек следует рассматривать как дополнительную важную информацию к традиционному подходу выявления источников загрязнения на предварительной стадии их идентификации. Его применение позволяет: 1) косвенно оценить происхождение повышенных концентраций химических веществ (природное или антропогенное) в воде водного объекта, что особенно важно в трансграничных створах; 2) определить тип источника загрязнения (рассредоточенный или сосредоточенный), что сокращает временные и финансовые затраты выявления конкретного нарушителя водного законодательства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фащевская Т. Б., Полянин В. О., Кирпичникова Н. В. Диффузное загрязнение водных объектов: источники, мониторинг, водоохранные мероприятия. М.: Институт водных проблем РАН, 2020. 171 с.
2. Behrendt H. Point and diffuse loads of selected pollutants in the river Rhine and its main tributaries. Vienna: International Institute for Applied Systems Analysis, 1993. 84 p.
3. Novotny V. Diffuse (nonpoint) pollution – a political, institutional, and fiscal problem // Journal of Water Pollution Control Federation. 1988. Vol. 60. No. 8. P. 1404–1413.

4. Albek E. Estimation of Point and Diffuse Contaminant Loads to Streams by Non-Parametric Regression Analysis of Monitoring Data // Water, Air & Soil Pollution. 2003. Vol. 147. P. 229–243. https://doi.org/10.1023/A:1024592815576
5. Данилов-Данильян В. И., Полянина В. О., Фащевская Т. Б., Кирпичникова Н. В., Козлова М. А., Веницианов Е. В. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохранных программ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 503–514. https://doi.org/10.31857/S0321059620050053
6. Болгов М. В., Завьялова Е. В., Зайцева А. В., Осипова Н. В. Оценка диффузного стока с урбанизированных территорий в бассейне р. Волги (на примере г. Ростова) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 483–492. https://doi.org/10.31857/S032105962005003X
7. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / под ред. В. И. Данилов-Данильяна [и др.]. М.: РАН, 2020. 512 с.
8. Дрюпина Е. Ю., Эйрих А. Н., Эйрих С. С., Папина Т. С. Влияние крупных городов на качество речных вод (на примере р. Обь в районе г. Барнаула) // Вода: химия и экология. 2014. № 7. С. 3–9.
9. Зиновьев А. Т., Папина Т. С., Кудишин А. В., Ловцкая О. В., Дьяченко А. В., Марусин К. В., Носкова Т. В. Экспериментальные исследования и моделирование качества воды для оценки влияния диффузного стока с урбанизированных территорий // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. М.: Студия Ф1, 2019. С. 359–365.
10. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
11. Михайлов С. А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели. Барнаул: День, 2000. 131 с.
12. Ясинский С. В., Вишневская И. А., Веницианов Е. В. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 2. С. 232–244. https://doi.org/10.31857/S0321-0596462232-244
13. Papina T. S., Eirikh A. N., Serykh T. G., Dryupina E. Yu. Space and time regularities in the distribution of dissolved and suspended manganese forms in Novosibirsk Reservoir water // Water Resources. 2017. Vol. 44. No. 2. P. 276–283. https://doi.org/10.1134/S0097807817020105
14. Мотовилов Ю. Г., Фащевская Т. Б. Пространственно-распределенная модель формирования стока тяжелых металлов в речном бассейне // Вода, химия и экология. 2018. № 1–3. С. 18–31.
15. Назаров Н. А. Оценки эрозионного смыва почв и выноса биогенных элементов с поверхностным стоком талых и дождевых вод в речном бассейне // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 6. С. 645–652.
16. Kondratyev S., Mendel O. Mathematical Modelling of Runoff and Material Transport from Drainage Areas into Recipient Water Bodies // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 237–240.
17. Tsakiris G., Alexakis D. Water quality models: an overview // European Water. 2012. No. 37. P. 33–46.
18. Теличенко В. И., Курочкина В. А., Блази К. Изменение качества воды и донных отложений водных объектов в условиях влияния техногенной нагрузки // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 4. С. 35–39.
19. Ясинский С. В., Кашутина Е. А., Сидорова М. В. Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблемы оценки // Известия РАН. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 1. С. 115–130. https://doi.org/10.31857/S258755662301017X
20. Chaddock R. E. Principles and Methods of Statistics. Cambridge: The Riverside Press, 1925. 471 p.

REFERENCES

1. Fashchevskaya, T. B., Polyanin, V.O. and Kirpichnikova, N. V. Diffuse Pollution of Water Bodies: Sources, Monitoring, and Water Protection Measures. Moscow: Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, 2020, 171 p. (in Russ.)

2. Behrendt H. Point and diffuse loads of selected pollutants in the river Rhine and its main tributaries. Vienna: International Institute for Applied Systems Analysis, 1993. 84 p.
3. Novotny V. Diffuse (nonpoint) pollution – a political, institutional, and fiscal problem. *Journal of Water Pollution Control Federation*. 1988. Vol. 60. № 8. P. 1404–1413.
4. Albek E. Estimation of Point and Diffuse Contaminant Loads to Streams by Non-Parametric Regression Analysis of Monitoring Data. *Water, Air & Soil Pollution*. 2003. Vol. 147. P. 229–243. https://doi.org/10.1023/A:1024592815576
5. Danilov-Danilyan V. I., Polyanin V. O., Fashchevskaya T. B., Kirpichnikova N. V., Kozlova M. A., Venitsianov E. V. The problem of reducing the diffuse pollution of water bodies and improving the efficiency of water protection programs. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. No. 5. P. 691–701.
6. Bolgov M. V., Zav'yalova E. V., Zaitseva A. V., Osipova N. V. Evaluating the diffuse runoff from urban territories in the Volga basin: case study of Rostov city. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. No. 5. P. 673–681.
7. Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions / edited by V. I. Danilov-Danilyan [et al]. M.: RAS, 2020. 512 p. (in Russ.).
8. Dryupina E. J., Eirich A. N., Eirich S. S., Papina T. S. Influence of large cities on river water quality (by the example of the Ob River near Barnaul). *Water: Chemistry and Ecology*. 2014. No. 7. P. 3–9 (in Russ.).
9. Zinoviev A. T., Papina T. S., Kudishin A. V., Lovtskaya O. V., Dyachenko A. V., Marusin K. V., Noskova T. V. Experimental studies and modeling of water quality to assess the impact of diffuse runoff from urbanized areas. Scientific problems of improving the health of Russian rivers and ways to solve them. Moscow: Studio F1, 2019. P. 359–365 (in Russ.)
10. Kondratiev S. A., Shmakova M. V. Mathematical modeling of mass transfer in the catchment-watercourse-reservoir system. St. Petersburg: Nestor-History, 2019. 246 p. (in Russ.).
11. Mikhailov S. A. "Diffuse Pollution of Aquatic Ecosystems: Assessment Methods and Mathematical Models. Barnaul: Day, 2000, 131 p. 9 (in Russ.).
12. Yasinskii S. V., Vishnevskaya I. A., Venitsianov E. V. Diffuse pollution of water bodies and estimation of export of biogenic elements under different scenarios of water use in the watershed *Water Resources*. 2019. Vol. 46. No. 2. P. 266–277.
13. Papina T. S., Eirikh A. N., Serykh T. G., Dryupina E. Yu. Space and time regularities in the distribution of dissolved and suspended manganese forms in Novosibirsk Reservoir water. *Water Resources*. 2017. Vol. 44. No. 2. P. 276–283. https://doi.org/10.1134/S0097807817020105
14. Motovilov Iu. G., Fashchevskaia T. B. Spatially distributed model of the heavy metals flow formation in the river basin. *Water: Chemistry and Ecology*. 2018. No. 1–3. P. 18–31 (in Russ.).
15. Nazarov N. A. Estimation of soil erosion and removal of biogenic elements with surface runoff of melt and rainwater in a river basin. *Water Resources* 1996. Vol. 23. No. 6. P. 645–652 (in Russ.).
16. Kondratyev S., Mendel O. Mathematical Modelling of Runoff and Material Transport from Drainage Areas into Recipient Water Bodies. *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 237–240.
17. Tsakiris G., Alexakis D. Water quality models: an overview. *European Water*. 2012. No. 37. P. 33–46.
18. Telichenko V. I., Kurochkina V. A., Blasi K. A change of water quality and sediment processes in water objects under technogenic impact. *Ecology of Urban Areas*. 2014. No. 4. P. 35–39 (in Russ.).
19. Yasinsky S.V., Kashutina E. A., Sidorova M. V. The Current State of the Problem of Assessing the Characteristics of Water Bodies Diffuse Pollution in Lowland Watersheds. *Newsletters of the Russian Academy of Science. Series: Geography*. 2023. Vol. 87. No. 1. P.115–130. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S258755662301017X
20. Chaddock R. E. Principles and Methods of Statistics. Cambridge: The Riverside Press, 1925. 471 p.

Сведения об авторах:

Папина Татьяна Савельевна, д-р хим. наук, начальник химико-аналитического центра, ФБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; https://orcid.org/0000-0002-8388-7289; e-mail: papina@iwep.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна, старший научный сотрудник, ФБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; https://orcid.org/0000-0002-3942-1350; e-mail: lov@iwep.ru

Жерелина Ирина Владимировна, канд. геогр. наук, начальник отдела водного хозяйства и охраны окружающей среды, ООО «Центр инженерных технологий», Россия, 656031, г. Барнаул, ул. Папанинцев, 129; https://orcid.org/0000-0003-1446-4087; e-mail: zherelina@mail.ru

About the authors:

Tatyana S. Papina, Doctor of Chemical Sciences., Head, Chemical Analytical Centre, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Molodezhnaya, 1, Barnaul; 656038, Russia; https://orcid.org/0000-0002-8388-7289; e-mail: papina@iwep.ru

Olga V. Lovtskaya, Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Molodezhnaya, 1, Barnaul; 656038, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3942-1350; e-mail: lov@iwep.ru

Irina V. Zherelina, Candidate of Geographic Sciences, Head, Department of Water Management and Environmental Protection, Engineering Technologies Center LLC, ul. Papanintsev 129, Barnaul; 656031, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1446-4087; e-mail: zherelina@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 07.04.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 27.04.2026.
Принята к публикации / Accepted 14.05.2026.