

СТАТЬЯ

УДК 550.461:543.3
DOI 10.17513/use.38308

**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ВОД МАЛЫХ РЕК ПРИИШИМЬЯ**

¹Шуплецова П.А., ¹Белюсова Ю.О., ²Ларин С.И., ¹Ларина Н.С.

¹ФГБОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень,
e-mail: polina.a.shupletsova@gmail.com;

²Институт криосферы Земли ФГБУН ФИЦ Тюменского научного центра
Сибирского отделения Российской академии наук, Тюмень, e-mail: silarin@yandex.ru

Целью данного исследования являлось изучение особенностей гидрохимического состава вод малой реки Ик на всей ее протяженности. Пробы воды отбирались вблизи населенных пунктов на всей протяженности реки для учета влияния природных и антропогенных факторов на формирование химического состава вод. В пробах воды были определены интегральные показатели (рН, удельная электропроводность, взвешенные вещества, цветность, перманганатная окисляемость, растворенный кислород), определено содержание главных ионов и биогенных веществ. В ходе мониторинга были зафиксированы изменения химического состава и качества вод реки за последние 55 лет (по исследованиям 1965, 1991, 2020 гг.). Установлено, что минерализация вод р. Ик значительно снижается от истока к устью. В настоящее время воды реки относятся к слабощелочным, наблюдается тенденция к их защелачиванию. Гидрохимическая классификация со временем изменилась принципиально (гидрокарбонатно-кальциевые), но содержание ионов натрия значительно возросло. Органические вещества и соединения азота содержатся в пределах установленной нормы. В 2020 г., по сравнению с более ранними исследованиями, проблема повышенного содержания фосфатов значительно усугубилась (увеличилась на порядок), в связи с различными источниками антропогенного поступления в речную систему и обмелением реки. Это увеличивает процесс эвтрофикации реки, что может вызвать развитие цианобактерий и увеличение степени токсичности воды. Увеличение количества растворенного кислорода и снижение содержания взвешенных веществ может привести к усилению процессов самоочищения рек.

Ключевые слова: малые реки, мониторинг, гидрохимический состав вод, динамика, антропогенное влияние

Исследование выполнено в рамках госзадания № FWRZ-2021-0012 с использованием оборудования Центра коллективного пользования Тюменского государственного университета «Рациональное природопользование и физико-химические исследования».

**FEATURES OF THE PRIISHIMYE SMALL RIVERS
WATERS HYDROCHEMICAL COMPOSITION**

¹Shupletsova P.A., ¹Belousova Yu.O., ²Larin S.I., ¹Larina N.S.

¹Tyumen State University, Tyumen, e-mail: polina.a.shupletsova@gmail.com;

²Institute of the Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, e-mail: silarin@yandex.ru

The purpose of this work was to study the characteristics of the small Ik river waters hydrochemical composition along its entire length. Water samples were taken near settlements to consider the influence of natural and anthropogenic factors on the formation of waters chemical composition. Integral indicators, the content of major ions and biogenic substances were determined in the water samples. Changes in the chemical composition and quality of river waters had been recorded over the past 55 years (according to studies in 1965, 1991, 2020). It had been established that the mineralization of the Ik river waters decreases significantly from source to mouth. Over time, the water becomes alkalized. Currently they are classified as slightly alkaline. The hydrochemical classification does not change fundamentally over time (bicarbonate-calcium), but the content of sodium ions has increased significantly. Organic substances and nitrogen compounds are contained within the established norm. In 2020, compared to earlier research, the problem of high phosphate levels has worsened. The reasons are anthropogenic pollution of the river system and swallowing of the river. This increases the process of the river eutrophication, which can cause the development of cyanobacteria and an increase in the degree of toxicity of the water. An increase in the amount of dissolved oxygen and a decrease in the content of suspended solids can lead to increased self-purification processes of the river.

Keywords: small rivers, monitoring, hydrochemical composition of waters, dynamics, anthropogenic influence

The study was carried out within the framework of the state task no. FWRZ-2021-0012 using the equipment of the Center for Collective Use of Tyumen State University "Rational Environmental Management and physico-chemical research".

Введение

Актуальность проблемы загрязнения речных экосистем существенно возросла в связи с нарастающим дефицитом пре-

сных вод [1; 2], связанным в том числе с изменением климата, обмелением рек, изменением их гидрохимического состава. Решение проблемы загрязнения рек требу-

ет комплексного подхода к их мониторингу в связи с увеличением числа факторов, влияющих на состав вод [3; 4]. Малые реки являются формирующим звеном более крупных речных экосистем, поэтому их изучение является актуальным направлением гидрохимических исследований [5–7]. Антропогенное воздействие на малые реки, увеличение количества неочищаемых стоков, строительство плотин и изменение русел приводит к серьезным изменениям в гидрологическом и гидрохимическом режиме рек, качестве вод, возможности их использования для питьевых и технических целей [8]. Низкая способность к самоочищению, связанная, в частности, с относительно небольшой площадью малых рек, низкой скоростью движения водных масс, а на некоторых участках – ее отсутствие делает их более уязвимыми к загрязнениям, приводит к преждевременному переходу рек в фазу старения: снижению водности, интенсификации эвтрофирования и т.п. [9]. Эти факторы приводят к распространению в воде опасных патогенов и поллютантов, многие речные воды невозможно использовать в связи с риском для здоровья человека, значительно снижается качество растительной, животной и рыбной продукции.

На юге Западной Сибири имеется большое количество рек разного масштаба, играющих важную роль в водообеспечении региона. Гидрологическая сеть региона широка и разнообразна и включает в том числе большое количество малых рек, формирующих водный ресурс более крупных рек. Например, одним из левых притоков р. Ишим является малая река Ик (длина реки 118 км) и ее приток (р. Черемшанка), бассейн которой расположен на границе лесостепной и подтаежной зон Западно-Сибирской равнины. Водосборная площадь (2830 км²) реки имеет довольно высокую заболоченность (10–15%). На берегах реки расположено значительное количество небольших поселений, вблизи которых открытые участки используются под пашни, сенокос и выгон. Грунты бассейна суглинистые и торфяные. Стационарные наблюдения на р. Ик по ограниченному числу гидрохимических показателей проводились в 1964–1967 гг. у с. Готопутово [10, с. 326–327], которые в 1967 г. были закрыты в связи с возведением плотин на реке. В 1991 г. авторами [11] проведено гидрологическое описание реки, потенциальных источников загрязнения, определен гидрохимический состав вод (у д. Боково), которая расположена несколько

ниже с. Готопутово. Проведение мониторинга реки, даже малой, в одной точке не позволяет получить информацию о динамике изменения состава вод реки на всей ее протяженности, установить источники загрязнения рек и оценить способность реки к самоочищению. Кроме того, отбор проб в различных точках также может привести к невозможности сопоставления результатов, полученных в разное время, что затрудняет мониторинг рек в связи с отсутствием стационарных пунктов наблюдений. Однако наличие даже столь скудных данных позволит оценить характер происходящих изменений в качестве вод малых рек данного региона в течение последних 60 лет.

Целью данного исследования являлось изучение особенностей гидрохимического состава вод малой реки Ик на всей ее протяженности, что позволит подойти к мониторингу реки и оценке качества вод и источников ее загрязнения и эвтрофирования за относительно большой промежуток времени.

Для этого пробы воды анализировались на содержание главных ионов и биогенных веществ вблизи населенных пунктов на всем протяжении реки. Определены интегральные показатели качества вод. Проведено сопоставление полученных результатов с полученными ранее [10, с. 325–327, 410–416; 11].

Материалы и методы исследования

Отбор проб воды в р. Ик (т. 1–11) и р. Черемшанка (т. 12) проводился в соответствии с нормативными документами [12, с. 6–127] в 2020 г. вблизи основных населенных пунктов (рис. 1). Пробы были профильтрованы через фильтр «синяя лента». При определении фосфора отдельно проводился анализ воды и взвешенных веществ.

Определение рН проводилось потенциометрически, удельной электропроводности (УЭП) – кондуктометрически, остальные интегральные показатели – методом титрования. Главные ионы, биогенные вещества определяли на установке «Капель-105», фосфаты – фотометрически.

Результаты исследования и их обсуждение

Интегральные показатели качества вод

По течению р. Ик рН воды изменяется незначительно и в среднем составляет $8,37 \pm 0,06$ (рис. 2, а), то есть воды относятся к классу слабощелочных.

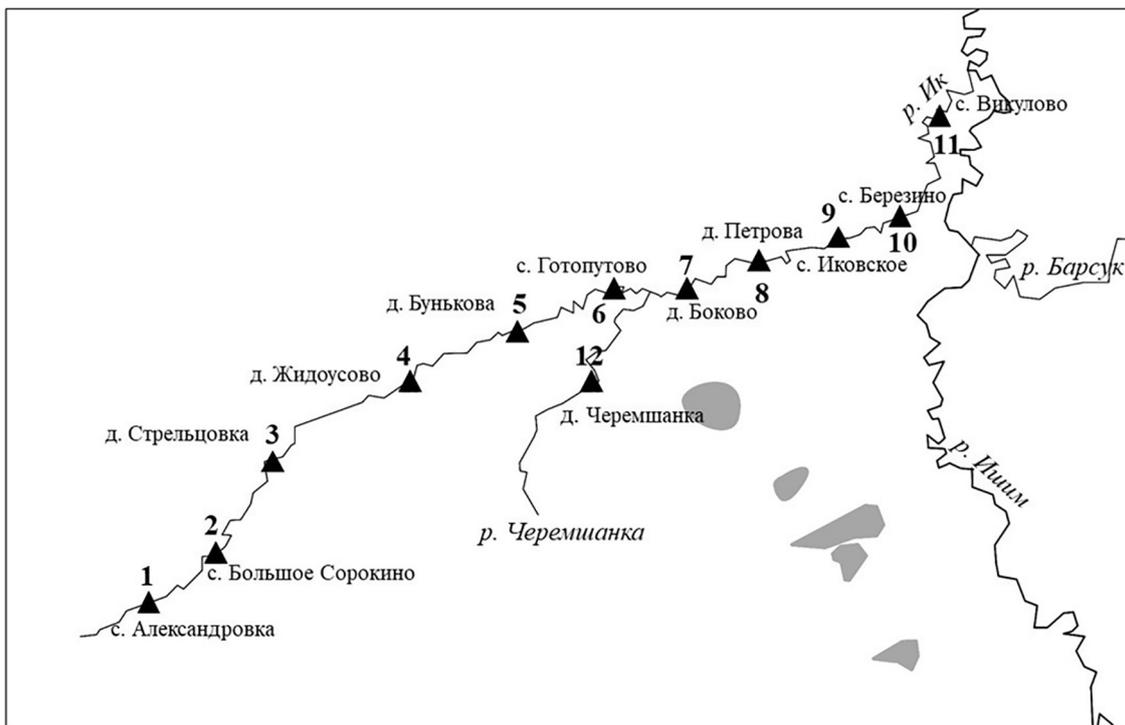


Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб воды на р. Ик и ее притоке (р. Черемшанка)

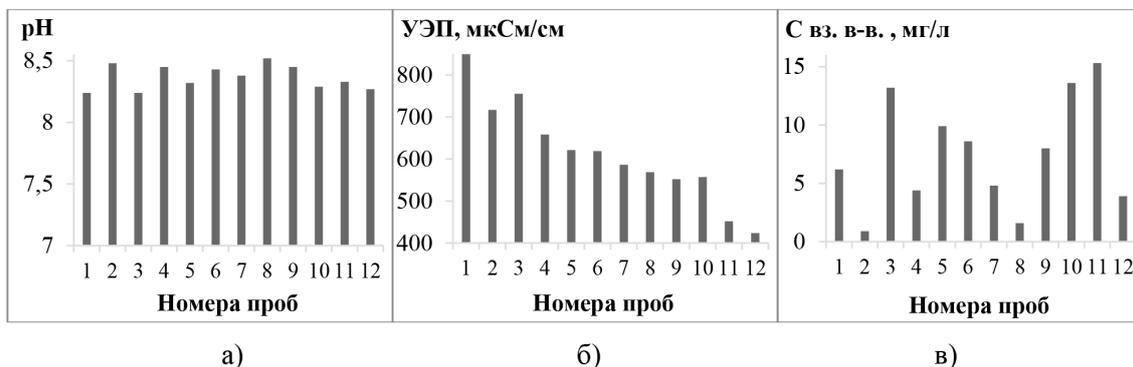


Рис. 2. Распределение значений pH (а), удельной электропроводности УЭП (б) и концентрации взвешенных веществ (в) в р. Ик и Черемшанка

В 1964–1967 гг. значения pH по этой реке отсутствуют, а в 1991 г. у с. Боково [11] pH составляло $7,63 \pm 0,20$, что свидетельствует о смещении pH в щелочную область в период наблюдений. В р. Ишим pH воды ниже (8,10) [14], то есть вода р. Ик может оказывать влияние на кислотность вод принимающей реки.

Минерализация вод реки Ик (УЭП) изменяется от 850 (у истока) до 450 мкСм/см и в среднем составляет 613 ± 80 мкСм/см (рис. 2, б), то есть уменьшается почти в 2 раза от истока к устью. В этом наблюдается некоторое сходство изменения данного показателя в другом притоке р. Ишим –

р. Барсук [9]. На всей протяженности реки вода относится к пресным (до 1 г/л). В притоке р. Ик (т. 12, р. Черемшанка) зафиксировано минимальное значение минерализации – 424 мг/л. Река Черемшанка впадает в р. Ик между т. 6 и т. 7, что несколько понижает ее минерализацию. Однако более значительное снижение УЭП наблюдается после т. 10 (с. Березино), где река меняет направление, и к т. 11 (с. Викулово) УЭП уменьшается на 100 мкСм/см. При исследовании вод р. Ик в 1965 г. [10, с. 411] (т. 6, с. Готопутово) минерализация составляла 720 мг/л, сейчас – 620 мг/л, в 1991 г. (т. 7, с. Боково) минерализация вод была почти

в 2 раза ниже (400 мг/л), в 2020 г. минерализация снова увеличилась почти в 1,5 раза (590 мг/л), хотя осталась несколько ниже, чем в 1965 г. По данным [13], минерализация вод р. Ишим составляет 690 мг/л, что значительно выше, чем в устье р. Ик.

Содержание *взвешенных веществ* (ВВ) на всей протяженности реки не превышает установленную норму для поверхностных вод (30 мг/л), но изменяется в широких пределах – от 0,9 до 15,3 мг/л (рис. 2, в). Максимальное содержание взвешенных веществ наблюдается в устье реки – т. 10 и 11, минимальное в т. 2 и 8, а также в р. Черемшанка (т. 12). В 1991 г. содержание ВВ у с. Боково (т. 7) составляло 58 мг/л [11], что превышало норму почти в 2 раза. Столь существенное снижение содержания ВВ за последние 30 лет может быть связано с понижением уровня реки в межень в связи с климатическими факторами и снижением размыва плотин со временем.

Показатель цветности на протяжении реки (рис. 3, а) варьируется в пределах 10 градусов цветности (от 25 до 35) и в среднем составляет 34 ± 4 град. цв. Исключения составляют т. 2 (с. Большое Сорокино) и 12 (р. Черемшанка). В т. 2 это может быть связано с болотным питанием реки на этом участке или антропогенным воздействием, что более вероятно. Причиной может быть резкое изменение формы долины в этой части реки, здесь она перекрыта земляной долиной с отводом воды через две трубы, ее пересекает грунтовая дорога. На этом участке реки наблюдается зарастание, засоренность остатками растительности, отходами с ферм, что также может влиять на цветность и мутность вод. Плотина, расположенная на р. Черемшанка (т. 12), приводит

к размыванию берегов в период половодья и приводит к отсутствию стока. Воды малой реки Ик имеют относительно невысокие значения показателя цветности, но для большинства проб она значительно выше значений, характерных для р. Ишим (5 град. цв.) [13], что представляет некоторую опасность загрязнения вод основной реки.

Перманганатная окисляемость (ПО), характеризующая содержание легко окисляемых органических веществ, распределена неравномерно по течению реки (рис. 3, б). В среднем по реке ПО составляет $4,6 \pm 1,0$ мгО/л, что соответствует нормальным значениям для поверхностных вод (5–12 мгО/л), а в половине точек отбора – ниже 5 мгО/л. Исключением является т. 2 (с. Б. Сорокино), где окисляемость выше средней более чем в 2 раза, что согласуется с величиной цветности.

Содержание *растворенного кислорода* в р. Ик изменяется от 10 до 15 мг О₂/л, среднее значение по реке – $12,7 \pm 0,9$ мг О₂/л (рис. 3, в). Содержание растворенного кислорода в т. 7 (д. Боково) в 1991 г. [11] составляло $8,6 \pm 0,9$ мг О₂/л, к 2020 г. оно увеличилось до 13,1 мг О₂/л (почти в 2 раза). Относительно малая цветность воды и величина перманганатной окисляемости, а также высокое содержание растворенного кислорода на протяжении всей р. Ик свидетельствует о незначительном влиянии болотного питания на качество вод или высокой самоочищающей способности реки. В частности, увеличение количества растворенного О₂ и снижение концентрации ВВ по сравнению с данными 1991 г. [11] может свидетельствовать о некотором улучшении состояния реки и повышении ее самоочищающей способности.

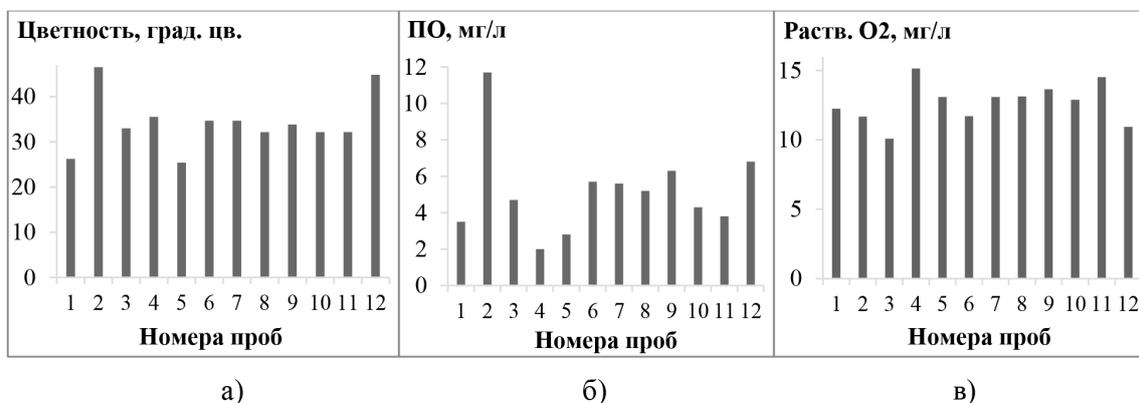


Рис. 3. Распределение показателя цветности (а), взвешенного вещества (б) и растворенного кислорода (в) в пробах р. Ик и ее притоке

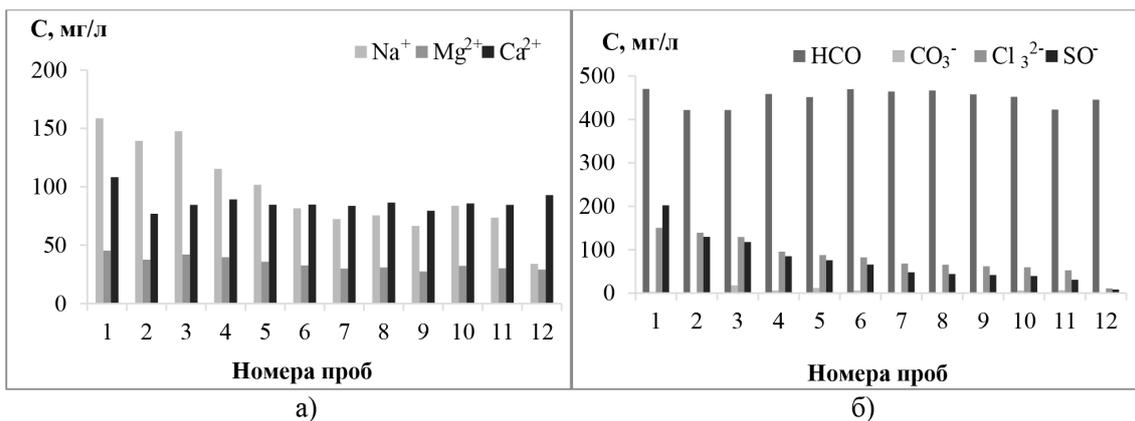


Рис. 4. Распределение содержания главных ионов: (а) катионов, (б) анионов – в пробах р. Ик и Черемшанка

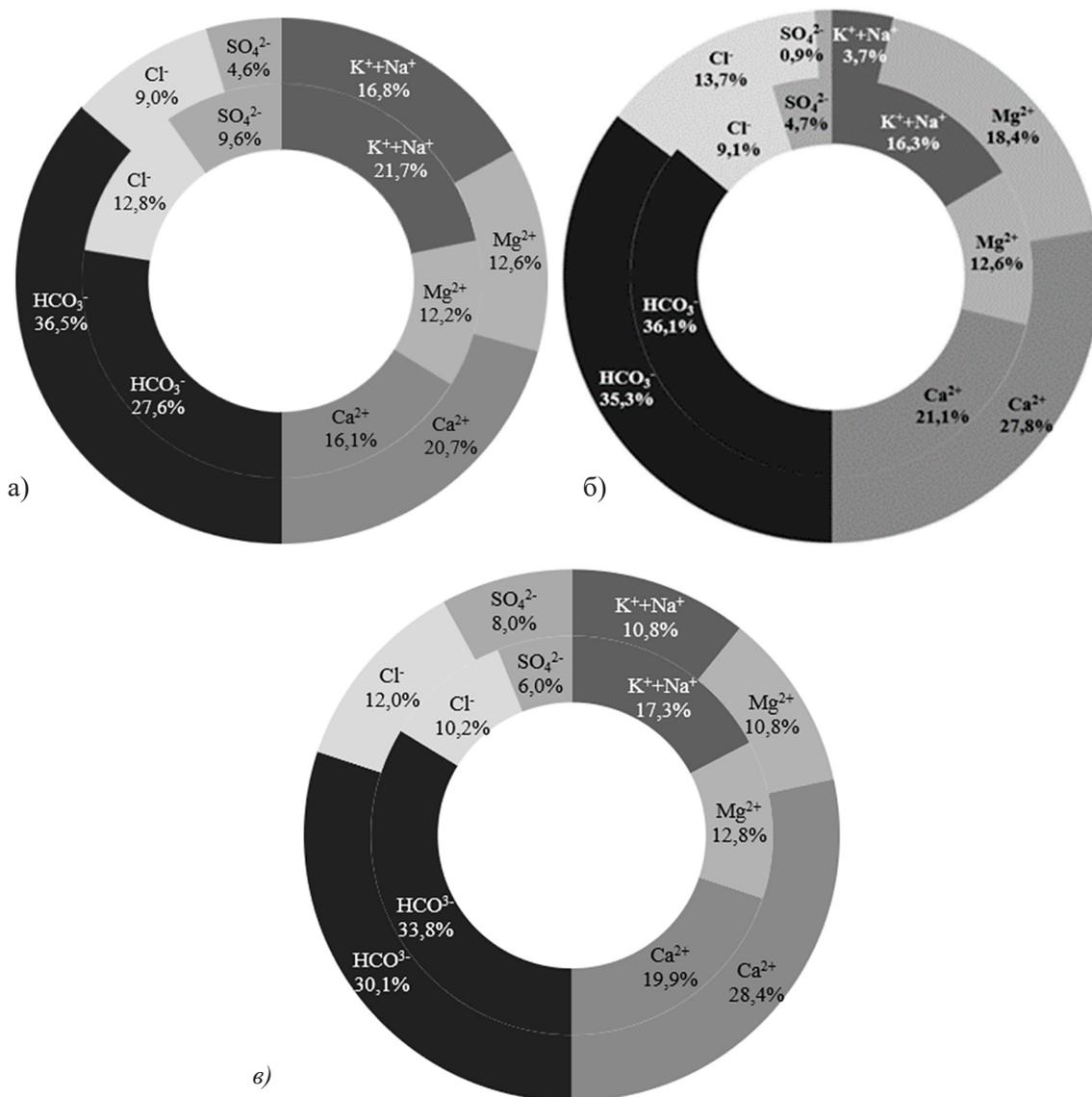


Рис. 5. Диаграммы Толстихина: (а) – в верховье (т. 1–5, внутреннее кольцо) и низовье (т. 6–11) р. Ик в 2020 г.; (б) – у д. Боково (внешнее – 1991 г.; внутреннее – 2020 г.); (в) – у с. Гопотутово (внешнее – 1965 г.; внутреннее – 2020 г.)

Гидрохимический состав вод характеризуется содержанием главных ионов (рис. 4). Концентрация ионов натрия (рис. 4, а) в верховье реки до т. 6 довольно высока и находится в пределах от 100 до 160 мг/л. В нижней части реки $C(\text{Na}^+)$ изменяется незначительно и составляет около 70 мг/л. Минимальное содержание ионов (34,04 мг/л) зафиксировано в р. Черемшанка (т. 12). Это более чем в 2 раза ниже среднего содержания ионов в р. Ик (95,87 мг/л). Содержание ионов Mg^{2+} и Ca^{2+} изменяется по течению реки незначительно, однако максимальные содержания ионов (45,4 и 108,3 мг/л соответственно) также зафиксированы у истока, в т. 1 (с. Александровка).

В анионном составе (рис. 4, б) преобладают HCO_3^- -ионы, содержание которых изменяется незначительно и в среднем составляет 450 ± 12 мг/л. Карбонат-ионы были обнаружены в точках отбора 1, 3, 4, 5, 6, 11 и 12. Максимальное содержание (18 мг/л) установлено в т. 3 (д. Стрельцовка). Концентрация Cl^- и SO_4^{2-} снижается, особенно в верховье р. Ик: снижение Cl^- – в 3 раза, SO_4^{2-} – более чем в 6 раз. Аномально низкие значения данных показателей зафиксированы в р. Черемшанка.

Различие в гидрохимическом составе в верховье и низовье р. Ик более наглядно проявляется при построении диаграмм Толстихина для средних значений на этих участках (рис. 5, а). Тип воды на обоих участках гидрокарбонатный натриево-кальциевый, но в низовье гидрокарбонат-ионы абсолютно преобладают (37%), а в верховье их содержание снижается до 28%, при этом концентрация Cl^- и SO_4^{2-} увеличивается.

Наличие литературных данных по гидрохимическому составу вод реки в 1991 [11] и 1965 гг. [10, с. 326–327] в средней части (д. Боково и с. Готопутово соответственно) позволило проследить многолетнюю динамику его изменения (рис. 5, б, в). В катионном составе т. 7 (у д. Боково) к 2020 г. значительно увеличилось (в 4 раза) содержание ионов Na^+ (рис. 5, б), а Mg^{2+} и Ca^{2+} снизилось примерно на 9%. А в анионном составе изменения не столь значительны, можно отметить значительный рост SO_4^{2-} . В 1991 г. воды (у д. Боково) относятся к гидрокарбонатно-кальциевым, с высоким содержанием магния. В 2020 г. класс воды не изменился (гидрокарбонатно-кальциевый), но наблюдается высокое содержание ионов Na^+ . Сопоставление данных 1965 и 2020 гг. было проведено в т. 6 (у с. Готопутово), так как в прошлом изучение состава воды проводилось только в этой точке. В настоящее время состав вод в т. 6 и 7 по ряду показателей различается значительно, что потребовало использования различных данных 2020 г. Наиболее значительные изменения произошли в катионном составе: содержание Na^+ увеличилось, а Ca^{2+} – снизилось более чем в 1,5 раза. В анионном составе изменения незначительны, наблюдается небольшое снижение содержания SO_4^{2-} и Cl^- за счет увеличения доли HCO_3^- . В 1965 г. воды р. Ик были отнесены к гидрокарбонатно-кальциевым. В 2020 г. тип воды аналогичен, но отмечается высокое содержание ионов Na^+ (18%), соизмеримое с долей кальция (20%) в катионном составе, то есть в данном случае можно говорить о гидрокарбонатно-кальциево-натриевом типе.

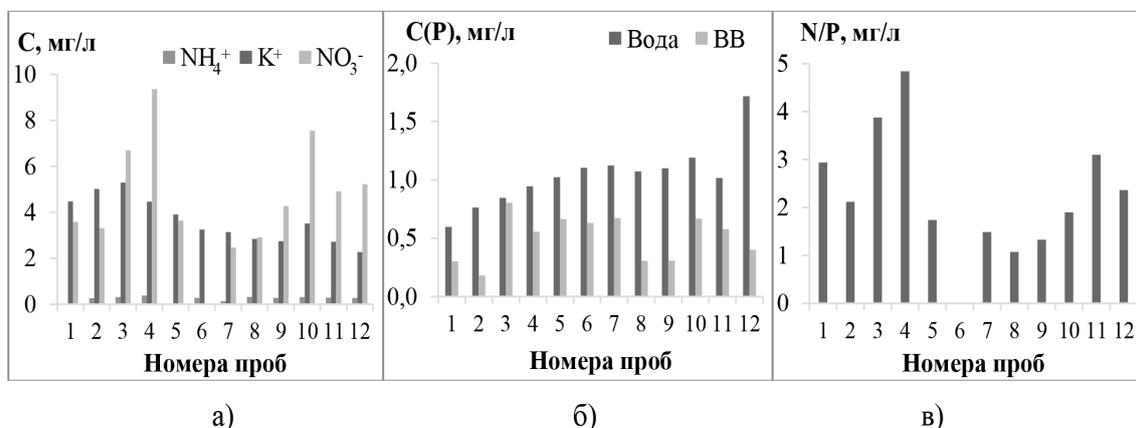


Рис. 6. Распределение содержания: (а) – калия, нитрат-ионов и ионов аммония в воде; (б) – фосфора в пробах воды и взвешенного вещества; (в) – соотношение $[N]:[P]$ в воде

Биогенные элементы определяют, с одной стороны, наличие питательных элементов в воде, с другой, степень эвтрофированности водотока. Средняя концентрация K^+ в воде составляет $3,7 \pm 0,6$ мг/л, но изменяется по течению реки неравномерно (рис. 6, а). Нитрит-ионы в воде не обнаружены. Концентрация ионов аммония не превышает ПДК и в среднем по реке составляет $0,23 \pm 0,07$ мг/л. Средняя концентрация NO_3^- в реке составила $4,49 \pm 1,41$ мг/л. Распределение ионов калия и нитрат-ионов имеет сходный характер. Тренды изменяются по реке трижды: рост – в верховье, относительная стабильность – в средней части реки и уменьшение в низовье. Наиболее ярко эти тренды проявляются для нитратов, что может свидетельствовать о загрязнении реки в т. 3, 4, 10 сельскохозяйственными, бытовыми или животноводческими стоками. Содержание фосфора определялось отдельно в воде и во взвешенном веществе (рис. 6, б). Среднее содержание в воде – $1,04 \pm 0,17$ мг/л, во взвешенном веществе – $0,51 \pm 0,13$ мг/л, то есть фосфор мигрирует преимущественно в растворенном виде. Превышение ПДК_{р-х} ($0,20$ мг/л) в 3–8 раз наблюдалось во всех точках отбора, что значительно выше содержания элемента в 1991 г. – $0,12$ мг/л ($1,2$ ПДК), то есть за последние 30 лет эвтрофирование вод прогрессирует.

Для оценки влияния азота и фосфора на эвтрофирование водного объекта часто используют соотношение N/P, поскольку баланс этих элементов в воде влияет на развитие фитопланктона [14]. Для развития зеленых водорослей требуется преобладание соединений азота, а для сине-зеленых (более токсичных водорослей) – фосфора. Оптимальным считается N/P равное 16, отклонение от которого связывают с развитием соответствующих видов водорослей. В р. Ик данный показатель изменяется от 1 до 5 (рис. 6, в), что существенно ниже оптимального и указывает на преобладающее влияние фосфора в продуцировании биомассы и в процессах эвтрофирования водного объекта. Это при высоком хроническом загрязнении реки вызывает ее зарастание, продуцирование цианобактерий, приводящих к отравлению людей и животных токсинами, а также к гибели рыбы.

Заключение

Вода р. Ик в настоящее время относится к слабощелочным, ее минерализация изменяется от 850 мг/л (у истока) до 450 мг/л (в устье реки). Сопоставление данных 1965,

1991 и 2020 гг. свидетельствует о ритмичности в изменении данного показателя со временем, что может быть связано с климатическими изменениями. Снижение содержания взвешенных веществ в р. Ик в 2020 г., по сравнению с 1991 г., может быть обусловлено значительным обмелением рек в 2020 г., уменьшением скорости водного потока. Увеличение количества растворенного кислорода и снижение концентрации взвешенных веществ по сравнению с данными 1991 г. может свидетельствовать о некотором улучшении состояния реки и повышении ее самоочищающей способности. В реке наблюдается значительное концентрирование фосфора в водорастворимой форме и во взвешенном веществе, которое превышает ПДК_{р-х} во всех точках отбора в 10–25 раз. За последние 30 лет содержание фосфора возросло более чем на порядок, что свидетельствует о резко возрастающей эвтрофированности реки. Азот представлен преимущественно нитратной формой, и его содержание не превышает ПДК_{р-х}. Соотношения азота и фосфора значительно ниже оптимального, что указывает на преобладающее влияние фосфора в продуцировании биомассы, это может привести к развитию цианобактерий и увеличению степени токсичности воды.

Список литературы

1. Ali M.M., Rahman S., Islam M.S., Rakib M.R.J., Hossen S., Rahman M.Z., Kormoker T., Idris A.M., Phoungthong K. Distribution of heavy metals in water and sediment of an urban river in a developing country: a probabilistic risk assessment // International journal of sediment research. 2022. Vol. 37, Is. 2. P. 173–187. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2021.09.002.
2. Zhang X., Zhang Y., Shi P., Bi Z., Shan Z., Ren L. The deep challenge of nitrate pollution in river water of China // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 770. P. 144674. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144674.
3. Md Anwar H., Chowdhury R. Remediation of polluted river water by biological, chemical, ecological and engineering processes // Sustainability. 2020. Vol. 12, Is. 17. P. 7017. DOI: 10.3390/su12177017.
4. Jia Z., Li S., Liu Q., Jiang F., Hu J. Distribution and partitioning of heavy metals in water and sediments of a typical estuary (Modaomen, South China): The effect of water density stratification associated with salinity // Environmental Pollution. 2021. Vol. 287. P. 117277. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117277.
5. Соромотин А.В., Кудрявцев А.А., Ефимова А.А., Гертер О.В., Фефилов Н.Н. Фоновое содержание тяжелых металлов в воде малых рек Надым-Пуровского междуречья // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 2. С. 48–55. DOI: 10.31857/S0869-78092019248-55.
6. Тарасюк Н.А., Полетаева В.И., Пастухов М.В. Факторы формирования гидрохимического состава поверхностных вод бассейна реки Куды (Иркутская область) // Геосферные исследования. 2023. № 4. С. 86–103. DOI: 10.17223/25421379/29/6.
7. Окрут С.В., Зеленская Т.Г., Степаненко Е.Е., Корвин А.А., Халикова В.А. Оценка влияния малых водотоков на гидрохимические и гидробиологические показатели

реки Подкумок // Успехи современного естествознания. 2023. № 2. С. 58–64.

8. Рыков Р.А., Урбанова О.Н., Горшкова А.Т., Бортникова Н.В. Характеристика качественного состава вод малых рек Нижнекамского муниципального района Республики Татарстан // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 69–74. DOI: 10.17513/use.37910.

9. Белоусова Ю.О., Ларин С.И., Шуплецова П.А., Ларина Н.С. Динамика изменения гидрохимического состава вод реки Барсук под влиянием природных и антропогенных факторов // Вода: химия и экология. 2023. № 11. С. 48–55.

10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Алтай и Западная Сибирь. Нижний Иртыш и Нижняя Обь. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. Т. 15, Вып. 3. 270 с.

11. Калинин В.М., Ларин С.И., Романова И.М. Малые реки в условиях антропогенного воздействия (на примере Восточного Зауралья). Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 1998. С. 35–48.

12. Комплексное гидрохимическое и биологическое исследование качества вод и состояния водных и околоводных экосистем: методическое руководство: Ч. 2 / О.А. Алешина, Л.А. Волкова, С.С. Волкова, С.Н. Гашев и др. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2012. 304 с.

13. Протокол лабораторных испытаний № 6267 и № 6268 от 30 ноября 2020 г. // Официальный портал органов государственной власти Тюменской области [Электронный ресурс]. URL: <https://abatsk.admtymen.ru/> (дата обращения: 01.06.2024).

14. Кашулин Н.А., Беккелунд А.К., Даувальтер В.А. Особенности летнего пространственного распределения фосфора, азота и хлорофилла-а в крупном эвтрофируемом арктическом озере Имандра (Мурманская область) в связи с массовым развитием фотосинтезирующих микроорганизмов // Биосфера. 2020. Т. 12, № 3. С. 63–92. DOI: 10.24855/BIOSFERA.V12I3.547.