

УДК 504.45(504.4.054)
DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4524
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Условия формирования гидрохимического режима р. Вихорева и Усть-Вихоревского залива (Усть-Илимское водохранилище)

П.Г. Долгих[✉], В.И. Полетаева, М.В. Пастухов

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, г. Иркутск

[✉]pdolgikh@igc.irk.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью контроля за гидрохимическим режимом водоемов, в значительной степени подверженных антропогенным воздействиям. **Цель:** изучить пространственное распределение концентраций главных ионов и микроэлементов и выделить природные и антропогенные факторы формирования гидрохимического состава р. Вихорева и Усть-Вихоревского залива Усть-Илимского водохранилища. **Объекты:** воды р. Вихорева до и после поступления сточных вод Братской промышленной зоны, Усть-Вихоревский залив (Вихоревская и Бурдойская часть) Усть-Илимского водохранилища. **Методы.** Главные ионы определены с использованием стандартных методов, принятых в гидрохимических исследованиях, Сорг – титриметрическим методом, кислород – йодометрическим методом. Определение в воде концентраций ртути выполнено атомно-абсорбционным методом, других микроэлементов – методом масс-спектрометрии с индуктивной связанной плазмой. **Результаты.** В воде р. Вихорева после поступления сточных вод Братской промышленной зоны обнаружены значительные преобразования ее гидрохимического состава. По акватории реки наблюдается снижение концентраций O_2 (до 0,3 мг O_2 /л) и повышение концентрации $C_{орг}$ (до 131 мг/л), SO_4^{2-} (до 262 мг/л), K^+ (до 10,6 мг/л), Cl^- (до 220 мг/л), Na^+ (до 240 мг/л), Mn (до 248,5 мкг/л), Cr (до 7,4 мкг/л), в меньшей степени Al (до 224,1 мкг/л), Co (до 0,26 мкг/л), Cu (до 5,4 мкг/л), Zn (до 43,2 мкг/л), Cd (до 0,126 мкг/л), Pb (до 0,40 мкг/л), Hg (до 0,0032 мкг/л). В водах Усть-Вихоревского залива концентрации большинства компонентов основного ионного состава и микроэлементов снижаются, по сравнению с водой р. Вихорева, в поверхностных водах. В придонных водах зафиксированы максимальные концентрации Mn (511,5 мкг/л), Fe (1567,2 мкг/л), Co (0,80 мкг/л), Pb (0,77 мкг/л). Основной ионный состав и концентрация микроэлементов в воде р. Вихорева определяется прежде всего антропогенным фактором. Вместе с этим в гидрохимический режим реки вносят свой вклад и природные факторы. На гидрохимию Усть-Вихоревского залива влияет как поступление вод высокoзагрязненной реки, так и формирующие его воды русловой части Усть-Илимского водохранилища.

Ключевые слова: загрязнение, главные ионы, микроэлементы, р. Вихорева, Усть-Илимское водохранилище

Благодарности: Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проекту № 0284-2021-0003.

Для цитирования: Долгих П.Г., Полетаева В.И., Пастухов М.В. Условия формирования гидрохимического режима р. Вихорева и Усть-Вихоревского залива (Усть-Илимское водохранилище) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 3. – С. 92–107. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4524

UDC 504.45(504.4.054)
DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4524

Conditions of formation of Vikhoreva river and Ust-Vikhorevsky bay hydrochemical regime (Ust-Ilimsk reservoir)

P.G. Dolgikh[✉], V.I. Poletaeva, M.V. Pastukhov

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

[✉]pdolgikh@igc.irk.ru

Abstract. Relevance. The necessity to control the hydrochemical regime of water bodies significantly affected by anthropogenic impacts. **Aim.** To study the spatial distribution of major ions and trace element concentrations and identify

natural and anthropogenic formation factors of the hydrochemical composition of the Vihoreva river and Ust-Vihorevsky bay of the Ust-Ilimsk reservoir. **Objects.** Waters of the Vihoreva river before and after inflow of wastewater from the Bratsk industrial zone, waters of the Ust-Vihorevsky bay (Vihorevskaya and Burdoykaya parts) of the Ust-Ilimsk reservoir. **Methods.** Determination of micronutrients concentrations in water was performed by inductive coupled plasma mass spectrometry, mercury – by atomic absorption method. Cations and anions were determined using standard methods accepted in hydrochemical studies, Sorg – by titrimetric method, oxygen – by iodometric method. **Results.** In the Vihoreva river water after wastewater inflow from the Bratsk industrial zone, significant transformations of its hydrochemical composition were detected. Along the water area of river decrease of O_2 concentrations (up to 0.3 mg O_2 /l) and increase of C_{org} (up to 131 mg/l), SO_4^{2-} (up to 262 mg/l), K^+ (up to 10.6 mg/l), Cl^- (up to 220 mg/l), Na^+ (up to 240 mg/l), Mn (up to 248.5 mg/l), Cr (up to 7.4 mg/l), to a lesser extent Al (up to 224.1 mg/l), Co (up to 0.26 mg/l), Cu (up to 5.4 mg/l), Zn (up to 43.2 mg/l), Cd (up to 0.126 mg/l), Pb (up to 0.40 mg/l), Hg (up to 0.0032 mg/l) are observed. In surface waters of the Ust-Vihorevsky bay concentrations of most components of the main ionic composition and trace elements decrease, as compared to the Vihoreva river water. Maximum concentrations of Mn (511.5 mg/l), Fe (1567.2 mg/l), Co (0.80 mg/l), Pb (0.77 mg/l) were detected in bottom waters. The main ionic composition and trace element concentrations in the Vihoreva river water are determined primarily by anthropogenic factor. At the same time, the hydrochemical regime of the river is effected by natural factors. Inflow of both waters of the highly polluted and forming waters of the channel part of the Ust-Ilimsk reservoir impacts the hydrochemistry of the Ust-Vihorevsky bay.

Keywords: pollution, major ions, trace elements, Vihoreva river, Ust-Ilimsk reservoir

Acknowledgements: The study was performed by the governmental assignment in terms of Project № 0284-2021-0003.

For citation: Dolgikh P.G., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Conditions of formation of Vihoreva river and Ust-Vihorevsky bay hydrochemical regime (Ust-Ilimsk reservoir). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 3, pp. 92–107. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4524

Введение

В настоящее время гидрохимический состав большинства водоемов зависит не только от природных, но и от антропогенных факторов [1, 2]. Среди потенциально опасных веществ антропогенного происхождения микроэлементы, в том числе металлы, занимают приоритетное место. Эти элементы, находящиеся в водной среде в концентрациях ниже 1 мг/л, с одной стороны, играют важную роль в гидросистемах [3], с другой – обладают высокой токсичностью и биодоступностью [4, 5].

Основным источником загрязняющих веществ для водных экосистем являются предприятия различных отраслей промышленности, расположенные на побережье водоема. Пути поступления загрязнителей с территорий промышленных зон на акваторию водоема является атмосферный перенос, поверхностный (дождевой и талый) сток и, несомненно, самый опасный – сточные воды [6, 7]. Сточные воды предприятий, обогащенные органическими и неорганическими веществами, являются мощными источниками загрязнения не только водных объектов, в которые они непосредственно поступают. Большинство рек, протекающих в зонах крупных промышленных зон и принимающих на себя основную техногенную нагрузку, сами становятся источником загрязнения для водоемов, в которые они впадают [8, 9].

Показательным примером миграции загрязняющих веществ в цепи «источник загрязнения – небольшой водоток – крупный водоем» является поступление сточных вод Братской промышленной зоны в р. Вихорева и далее в Усть-Илимское водохранилище, которое является неотъемлемой частью

крупнейшей в мире Байкало-Ангарской пресноводной системы. С территории Братской промышленной зоны, включающей предприятия химической, металлургической, лесоперерабатывающей и других видов промышленности, более семидесяти лет в небольшой водоток – р. Вихорева (левый приток р. Ангара) – поступают огромные количества разнообразных веществ антропогенного происхождения. На протяжении нескольких десятилетий р. Вихорева относится к наиболее загрязненным рекам РФ, а ее воды по степени загрязненности характеризуются как «очень загрязненные» и «грязные» [10, 11]. Несмотря на усовершенствование и реконструкцию основных технологических объектов предприятий Братской промышленной зоны и сокращение количества загрязняющих веществ в сточных водах, в открытой печати нередко появляются сообщения о фактах катастрофического воздействия антропогенной деятельности на всю экосистему р. Вихорева. Так, например, «природоохранной прокуратурой установлено, что в р. Вихорева в результате кислородного голодания погибло несколько сотен особей рыб различных пород» [12], «массовая гибель рыбы в р. Вихорева произошла в связи с превышением предельно допустимых концентраций диметилсульфида, хлороформа, нефтепродуктов, фенола и лигнина» [13] и т. д. В связи с этим исследования, сосредоточенные на сборе информации о качественных характеристиках и их пространственных изменениях в водной среде р. Вихорева и Усть-Илимском водохранилище, чрезвычайно важны для эффективного управления водными ресурсами.

Наиболее полное исследование, направленное на изучение влияния сточных вод на гидрохимический состав р. Вихорева, было проведено Т.А. Стрижевой [14] в 1974–1984 гг. Автором подробно изучена пространственно-временная динамика концентрации главных ионов и биогенных компонентов в воде р. Вихорева, р. Ангаре, образованного после зарегулирования реки Усть-Вихоревского залива и акватории Усть-Илимского водохранилища. В начале XXI в. исследования акцентировались на определении концентраций специфических для деревообрабатывающего производства загрязняющих веществ в р. Вихорева и Вихоревском заливе [15], а также концентраций основных ионов и биогенных компонентов в водной среде всего Усть-Илимского водохранилища [16, 17]. Показано, что, несмотря на анонсированные природоохранные мероприятия, негативное воздействие сточных вод предприятий Братской промышленной зоны на р. Вихорева продолжается и, как и прежде, обусловлено значительным увеличением концентраций сульфидов, сероводорода, взвешенных и биогенных веществ, сульфат ионов, ионов хлора и натрия и др. загрязнителей в водах реки. Помимо специфичных для каждого вида промышленности загрязняющих веществ, в окружающую среду потенциально может поступать большой спектр и других органических и неорганических соединений. Исследований, направленных на изучение концентраций микроэлементов в водной среде загрязненной р. Вихорева, не проводились. Всё это обусловило цель работы – выявление закономерностей пространственного распределения концентраций главных ионов и микроэлементов, а также выделение природных и антропогенных факторов формирования гидрохимического состава р. Вихорева и Усть-Вихоревского залива Усть-Илимского водохранилища.

Объекты и методы

Объект исследования. Глубокое малопроточное Усть-Илимское водохранилище, созданное на р. Ангаре, является третьим водохранилищем в каскаде Ангарских ГЭС. Природный ресурсный потенциал во многом определил специфику промышленности всей Восточной Сибири. Помимо крупных энергетических комплексов в бассейне р. Ангара и ее водохранилищ расположены предприятия химической, металлургической, лесоперерабатывающей и других видов промышленности, сгруппированные в крупные промышленные зоны. Деятельность предприятий этих зон существенно преобразует геохимический облик абиотических и биотических компонентов всей водной системы [18, 19]. К одной из таких зон относится расположенная в бассейне Усть-Илимского водохранилища промышленная зона г. Братска, в состав которой

входят предприятия гидроэнергетики, Братского лесопромышленного комплекса (БЛПК), крупнейший в России Братский алюминиевый завод (БрАЗ), завод ферросплавов и т. д.

По гидрологическим характеристикам р. Вихорева относится к небольшим водотокам. Длина реки 296 км, ширина до 25 м, глубина до 2 м, средние скорости течения от 0,1 до 2,8 м/с. Загрязнение реки началось уже при создании Вихоревского лесозаготовительного комбината (1956 г.). Далее при развитии промышленной инфраструктуры г. Братска были введены в эксплуатацию БЛПК (в настоящее время АО Группа «Илим») и БрАЗ. Помимо промышленных отходов в р. Вихорева поступают коммунальные стоки г. Братска и г. Вихоревка. С пуском производств БЛПК, БрАЗ и развитием г. Братска суммарный расход сточных вод в период зимней межени в 3–4 раза превышал естественный водный сток реки [14]. Из всего объема сточных вод, проходящих через очистные сооружения и поступающих в р. Вихорева, до нормативных показателей очищается только 1 %, а недостаточно очищенными сбрасывается 99 % [20]. Качественный состав и степень загрязненности сточных вод зависят от вида вырабатываемой продукции, мощности предприятий, вида и типа применяемого оборудования, а также выбранного метода очистки сточных вод. Многолетнее поступление сточных вод Братской промышленной зоны определило, что формирование Усть-Вихоревского залива, состоящего из двух частей (Вихоревский залив и Бурдойский залив), во время заполнения Усть-Илимского водохранилища уже происходило на фоне интенсивного загрязнения р. Ангара и р. Вихорева.

Станции отбора проб воды р. Вихорева (точки наблюдений (т.н.) 1–4), Вихоревского залива (т.н. 5–8) и Бурдойского залива (т.н. 9–12) Вихоревского залива Усть-Илимского водохранилища показаны на рис. 1. Отбор проб проведен батометром OceanTest110A. В воде р. Вихорева, заливов Бурдой и Тада пробы отбирались с поверхностного слоя воды, в Усть-Вихоревском заливе с двух горизонтов: поверхностного – с глубины 0,5 м и придонного – в метровом слое от дна.

Пробы воды для определения концентраций микроэлементов (Al, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg) отобраны в контейнеры объемом 15 мл, Hg – объемом 1 л, главных ионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ и Сорг) – объемом 1,5 л. На месте отбора пробы воды для определения Hg консервировались 2 % KMnO_4 (0,5 мл/л) и 50 % H_2SO_4 (1 мл/л), других микроэлементов – подкислены HNO_3 . Аналитические работы проведены в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск, Россия).

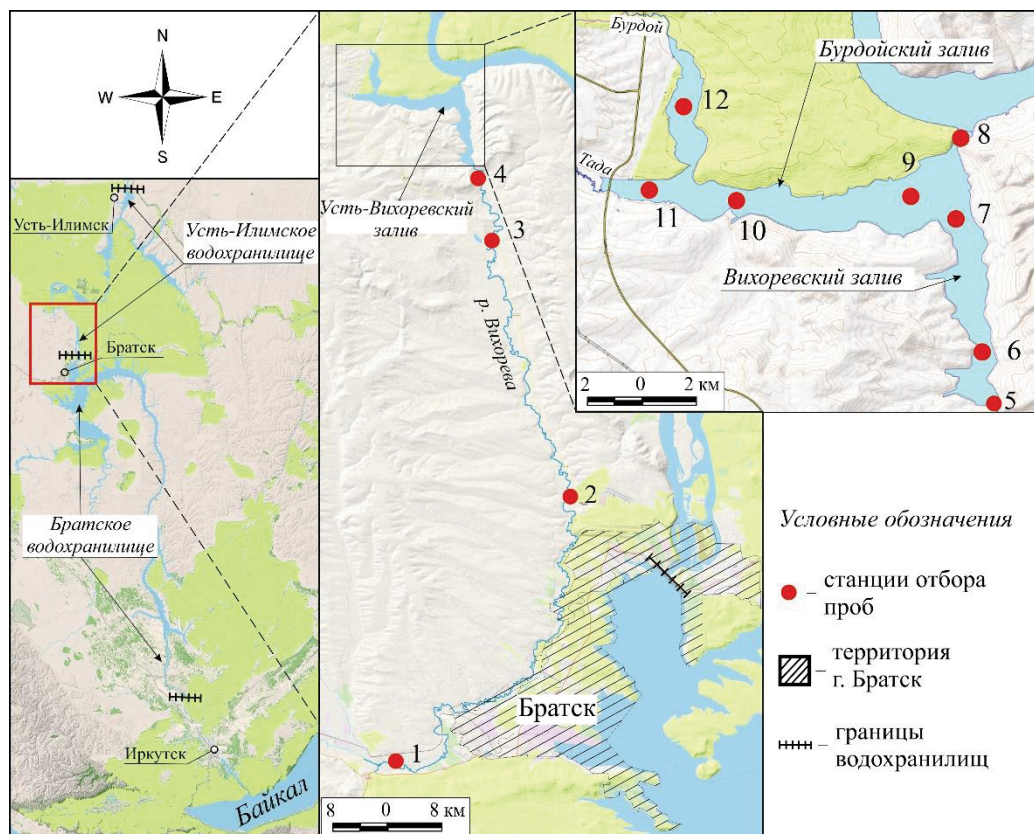


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб воды: 1 – 10 км ниже г. Вихорева (выше г. Братска); 2 – 1 км ниже сточных вод промышленной зоны г. Братска; 3 – 14 км выше устья реки; 4 – 1 км выше устья; Вихоревский залив: 5 – впадение р. Вихорева в залив; 6 – 2 км ниже устья р. Вихорева; 7 – перед слиянием Вихоревского и Бурдойского заливов; 8 – устье Усть-Вихоревского залива; Бурдойский залив: 9 – перед слиянием Бурдойского и Вихоревского заливов; 10 – слияние заливов Тада и Бурдой; 11 – зал. Тада; 12 – зал. Бурдой

Fig. 1. Map-scheme of water sampling stations: 1 – 10 km below the town of Vihorevka (above the town of Bratsk); 2 – 1 km below the sewage of the industrial zone of Bratsk; 3 – 14 km above the mouth of the river; 4 – 1 km above the mouth; Vihorevsky Bay: 5 – the river Vihoreva inflow into the Bay; 6 – 2 km below the mouth of Vihoreva river; 7 – before the confluence of Vihorev and Burdoy bays; 8 – mouth of Ust-Vihorev bay; Burdoy bay: 9 – before the confluence of Burdoy and Vihorev bays; 10 – confluence of Tada and Burdoy bays; 11 – Tada bay; 12 – Burdoy Bay

Определение в воде концентраций Al, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Cd, Pb выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивной связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре ELEMENT-2 (Thermo Finnigan, Bremen, Германия), Hg – атомно-абсорбционным методом на анализаторе РА-915⁺ с приставкой РП-91 (методом «холодного пара»). Катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) и анионы (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) определены с использованием стандартных методов [21]. Для определения концентраций органического углерода (Corg) рассчитано химическое потребление кислорода титриметрическим методом с последующим перерасчетом по эквивалентному отношению углерода к кислороду. Концентрации растворенного кислорода определены в полевых условиях йодометрическим методом.

Результаты и обсуждение

Длительную временную динамику техногенного влияния стоков Братской промышленной зоны хо-

рошо отражают органолептические характеристики вод р. Вихорева. В работе [14] показано, что до создания Усть-Илимского водохранилища коричневые воды высокозагрязненной реки при впадении резко контрастировали с голубовато-зелеными водами р. Ангары. Загрязненный поток характеризовался низкой прозрачностью (0,15–0,30 м), специфическим запахом, высокой цветностью и, самое показательное, устойчивой пеной и различными плавающими примесями (хлопья, слизь, радужные пятна и др.) на водной поверхности. В этот период зона влияния р. Вихорева распространялась по р. Ангаре на расстояние более 100 км. Создание водохранилища привело к улучшению качественных характеристик вод самой реки и зоны ее влияния, которая ограничивалась 10 км ниже по течению от устья реки [14]. В период настоящих исследований специфический запах, высокая цветность и пена отмечались на участках реки, приближенных к сбросам сточных вод. В районе слияния р. Вихо-

рева и Вихоревского залива характерные органо-лептические показатели загрязненных вод диагностируются менее четко, прозрачность воды 0,9 м.

Органическое вещество и кислородный режим

Одной из важнейших характеристик, определяющих эколого-геохимическую обстановку любого водного объекта, является концентрация растворенного кислорода в воде [22]. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к составу поверхностных вод рыбохозяйственного назначения РФ, содержание кислорода в водах не должно быть ниже 6 мг O_2 /л [23]. Считается, что гидробионты начинают испытывать стресс при концентрациях кислорода от 3 до 5 мг O_2 /л [22], а при концентрации 2 мг O_2 /л и менее водоем не может поддерживать удовлетворительные для жизнедеятельности гидробионтов условия [24]. Вода т.н. 1, расположенной выше стоков промышленной зоны г. Братска и поэтому принятой для оценки техногенного воздействия на р. Вихорева в качестве условно фоновой станции, содержит количество кислорода, достаточное для удовлетворительного существования гидробионтов и поддержания окислительной обстановки (рис. 2). После поступления сточных вод концентрация O_2 резко снижается, дефицит кислорода наблюдается на всем протяжении реки. Наиболее ярко это проявляется перед устьем реки (т. н. 4), где концентрация кислорода в воде падает до критических значений – 0,3 мг O_2 /л. Несомненно, что такой кислородный режим реки определяет стрессовые условия для гидробионтов, которые сопровождаются тяжелыми последствиями для их жизнедеятельности, вплоть до гибели.

Специфичный для сульфатцеллюлозного и деревообрабатывающего производств состав сточных вод БЛПК включает в себя большие количества взвешенных и органических (лигнин, нефтепродукты, метанол, фенол и т. д.) веществ [10]. Их при-

сутствие в р. Вихорева после впадения сточных вод (т.н. 2) определяется значительным увеличением концентрации Сорг, по сравнению с условно фоновым содержанием. Ниже по течению, вплоть до самого устья реки, концентрация Сорг остается повышенной. В связи с этим выделенное снижение концентраций кислорода в воде р. Вихорева свидетельствует об окислении большого количества органических веществ, поступающих со сточными водами.

В воде Вихоревского залива концентрации O_2 подвержены значительным вариациям (рис. 2). Несмотря на увеличение его концентраций в поверхностных слоях воды до нормативных для водоемов рыбохозяйственного назначения, в придонных слоях залива фиксируются близкие к нулю значения (0,59 мг O_2 /л). Только на выходе из Усть-Вихоревского залива концентрация кислорода по всей толще воды выше 9 мг O_2 /л. Концентрации Сорг в воде залива значительно снижаются, по сравнению с водой реки, составляя в среднем 12,1 мг/л. Воды Бурдойского залива содержат концентрации кислорода, достаточные для удовлетворительного обитания гидробионтов (табл. 1). Показатели органического вещества, составляющие в зал. Тада, зал. Бурдой и в районе их слияния 9,1–10,6 мг/л, увеличиваются в районе слияния Бурдойского и Вихоревского залива.

Главные ионы

Минерализация вод Вихоревского залива изменяется от 136,2 до 487,5 мг/л, Бурдойского залива – от 136,4 до 217,8 мг/л. Реакция среды близкая к нейтральной или слабощелочная (7,25–8,20). Более высокая минерализация определена в водах р. Вихорева (от 326,8 до 982,4 мг/л), величина рН слабощелочная (до 8,20). Концентрации главных ионов в воде р. Вихорева и в Усть-Вихоревском заливе показаны на рис. 3 и в табл. 1.

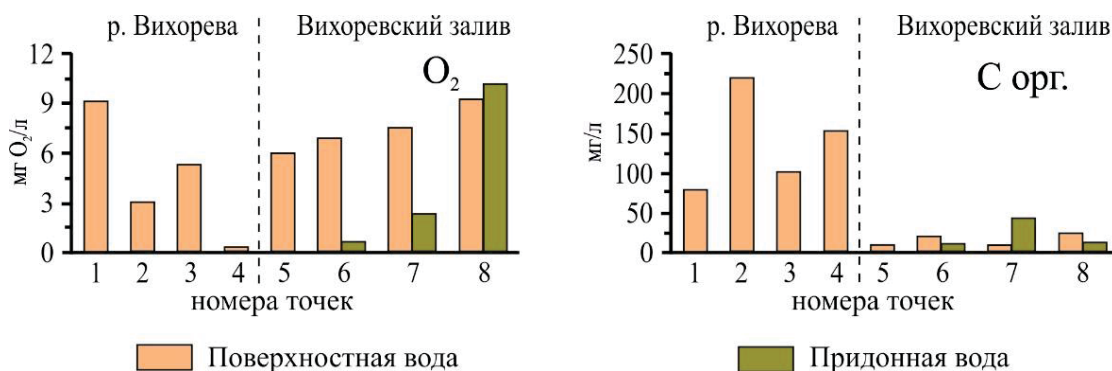


Рис. 2. Концентрация кислорода и органического углерода в воде р. Вихорева и Вихоревского залива. Примечание: Номера точек соответствует точкам наблюдений, указанных на рис. 1

Fig. 2. Concentration of oxygen and organic carbon in the water of the Vikhoreva river and Vikhorevsky bay. Note: Point numbers correspond to the observation points indicated in Fig. 1

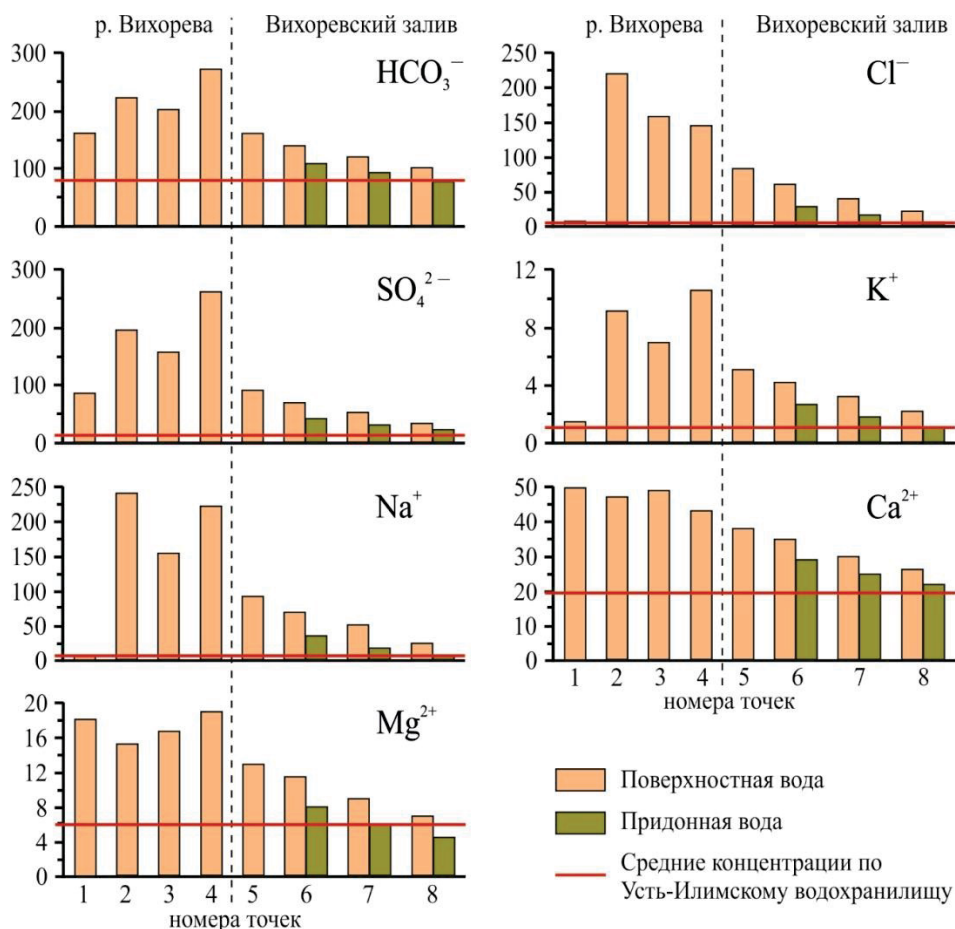


Рис. 3. Концентрации главных ионов (мг/л) в воде р. Вихорева и Вихоревском заливе (точки наблюдений соответствуют точкам наблюдений на рис. 1). Средние концентрации в воде русловой части Усть-Илимского водохранилища приведены по [16]

Fig. 3. Concentrations of major ions (mg/l) in the water of the Vikhoreva river and Vikhorevsky bay (observation points correspond to the observation points in Fig. 1). Average concentrations in the water of the channel part of the Ust'-Ilimsk reservoir are given according to [16]

Таблица 1. Концентрации главных ионов, кислорода и органического вещества в Бурдойском заливе (мг/л)

Table 1. Concentrations of major ions, oxygen and organic matter in the Burdoy bay (mg/l)

Точки наблюдений Observation points	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	O ₂	C орг
11	99,6	12,2	20,8	1,7	15,5	26,1	7,3	6,69	9,1
12	120,0	11,4	22,0	1,8	14,6	29,0	10,0	8,92	9,4
10	107,8	16,6	29,2	2,0	20,7	27,8	8,0	9,39	10,6
9 (п)/(s)*	105,9	20,4	32,4	2,2	22,0	27,0	7,0	9,31	19,7
9 (д)/(b)*	82,5	5,0	12,4	1,2	7,7	22,0	4,9	6,87	21,3

* – n – поверхностная, д – придонная вода/s – surface, b – bottom water.

В воде условно фоновой станции р. Вихорева (т.н. 1), по сравнению с русловой частью Усть-Илимского водохранилища, определены более высокие концентрации HCO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ и близкие концентрации Cl⁻ и Na⁺ (рис. 3). Такие гидрохимические показатели реки обуславливают природные факторы их формирования: фильтрация сульфатно-гидрокарбонатных подземных вод в днище долины реки [25] и выщелачивание гипсов, распространенных в ее бассейне [14]. Вместе с

этим доминирующим анионом в воде реки, так же как в Усть-Илимском водохранилище [16], является HCO₃⁻, катионом – Ca²⁺. Концентрации SO₄²⁻ > Cl⁻, Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺. К компонентам основного ионного состава, концентрации которых в водной среде увеличиваются под воздействием антропогенных факторов, относятся в основном Cl⁻ и SO₄²⁻ [26, 27]. Состав сточных вод Братской промышленной зоны также включает в себя большие количества хлорид- и сульфат-ионов. Так, в 1997 г. в

р. Вихорева за год сброшено 12860 т сульфат-иона, 30650 т хлорид-иона [10]. В 2016 г. приводятся еще большие значения поступающих в реку загрязняющих веществ: 27800 т сульфат-иона, 49989 т хлорид-иона [11]. Несомненно, для небольшой реки такие значительные объемы загрязняющих веществ отражаются в резком увеличении концентраций Cl^- и SO_4^{2-} в воде (рис. 3). Данных по концентрациям Na^+ и K^+ в сточных водах в официальных источниках не приводится. Вместе с этим на их антропогенное происхождение указывает значительное повышение (в 61 и 6 раз, соответственно) концентраций этих ионов в воде т.н. 2, по сравнению с т.н. 1. После поступления сточных вод в воде р. Вихорева концентрации $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$, концентрации $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.

В водах т.н. 3 и 4 р. Вихорева и т.н. 5–8 Вихоревского залива доминирующим анионом остается HCO_3^- . Концентрации $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, за исключением т.н. 3, в которой $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$. Соотношение катионов в воде реки и залива остается сходным с т.н. 2: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Только в придонной воде т.н. 7, поверхностной и придонной воде т.н. 8 Вихоревского залива Ca^{2+} , так же как в водах Усть-Илимского водохранилища, становится преобладающим. Далее следуют $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.

Закономерное последовательное уменьшение компонентов техногенного происхождения в р. Вихорева и Вихоревском заливе по мере течения вод от источника загрязнения наблюдается только для ионов хлора (рис. 3). Во всех точках наблюдения залива концентрации основных ионов в поверхностной воде выше, чем в русловой части Усть-Илимского водохранилища (рис. 3). Только в придонной воде устья Усть-Вихоревского залива (т.н. 8) концентрации главных ионов становятся близки к средним показателям по всему водохранилищу. Результаты исследования показали, что по всему Вихоревскому заливу концентрации главных ионов в поверхностном слое выше, по сравнению с придонным (рис. 3). Подобное явление, отмеченное и в предыдущих исследованиях [14], связано с растеканием более теплых, подогретых сточными водами р. Вихорева, по поверхности холодных вод р. Ангара.

Основной ионный состав Бурдоевского залива формируется с участием поступающих в него рек Тады и Бурдой [16]. Ближе к устьевым участкам рек (т.н. 11 и 12) концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ – основных компонентов, поступающих с сточными водами Братской промышленной зоны, ниже, чем в т.н. 10 Бурдоевского залива. Так же как в Вихоревском заливе в т.н. 9, концентрации катионов и анионов в поверхностной воде повышены, по сравнению с придонной. Выделенные особенности пространственного распределения главных ионов по-

казывают, что обмен вод между смежными частями Усть-Вихоревского залива, определяющийся гидродинамическими параметрами водоема, способствует распространению загрязненных вод р. Вихорева в Бурдойскую часть.

Микроэлементы

Концентрации микроэлементов в воде р. Вихорева, Вихоревском и Бурдойском заливах (рис. 4, табл. 2, 3) характеризуются широким диапазоном значений, мкг/л: Al (5,3–761,1), Cr (0,19–3,29), Mn (16,2–511,5), Fe (27,0–1567,2), Co (0,03–0,80), Cu (0,53–8,18), Zn (1,8–43,3), As (0,38–3,74), Cd (0,014–0,209), Pb (0,05–0,77) и Hg (0,0005–0,0049). Сравнение концентраций потенциально опасных микроэлементов с нормативами качества водоемов показывает, что в воде р. Вихорева и Вихоревском заливе зафиксированы концентрации Al, Mn, Fe, Cu и Zn, превышающие предельно-допустимые нормы для водоемов рыбохозяйственного назначения (ПДКрбх), Al, Mn и Fe – предельно-допустимые нормы для водоемов питьевого назначения (ПДКпв) (табл. 3). В воде Бурдойского залива концентрации Mn в придонной воде т.н. 9 выше ПДКпв, концентрации Mn во всех т.н. и Cu в т.н. 10 и 11 выше ПДКрбх.

Известно, что сравнение гидрохимических характеристик с официально утвержденными нормативами, не учитывающими природные условия формирования водоема, не дает адекватной оценки их качества [28]. Более объективно оценить антропогенное воздействие позволяют характеристики фоновых водных объектов, находящиеся с изучаемым водоемом в близких географических и климатических зонах. Для водоемов бассейна р. Ангара к таким водным объектам относится исток самой реки [29]. Результаты исследования показывают, что средние концентрации всех изучаемых микроэлементов в воде р. Вихорева и Вихоревском заливе значительно выше, чем их концентрации в истоке р. Ангара (табл. 3). Бурдойский залив характеризуется меньшими концентрациями микроэлементов, чем р. Вихорева и Вихоревский залив. Однако их концентрации, за исключением Zn, также выше, чем в истоке р. Ангара. Преобразования гидрохимического состава происходят уже в вышерасположенных водохранилищах Ангарского каскада ГЭС, в воде которых концентрации микроэлементов увеличиваются за счет природных и антропогенных факторов [30]. Концентрации Al, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As и Cd в воде р. Вихорева, Al, Cr, Mn, Fe, As и Cd в воде Вихоревского залива, Zn в воде Бурдойского залива выше, чем в русловой части Усть-Илимского водохранилища и Братского водохранилища (табл. 3).

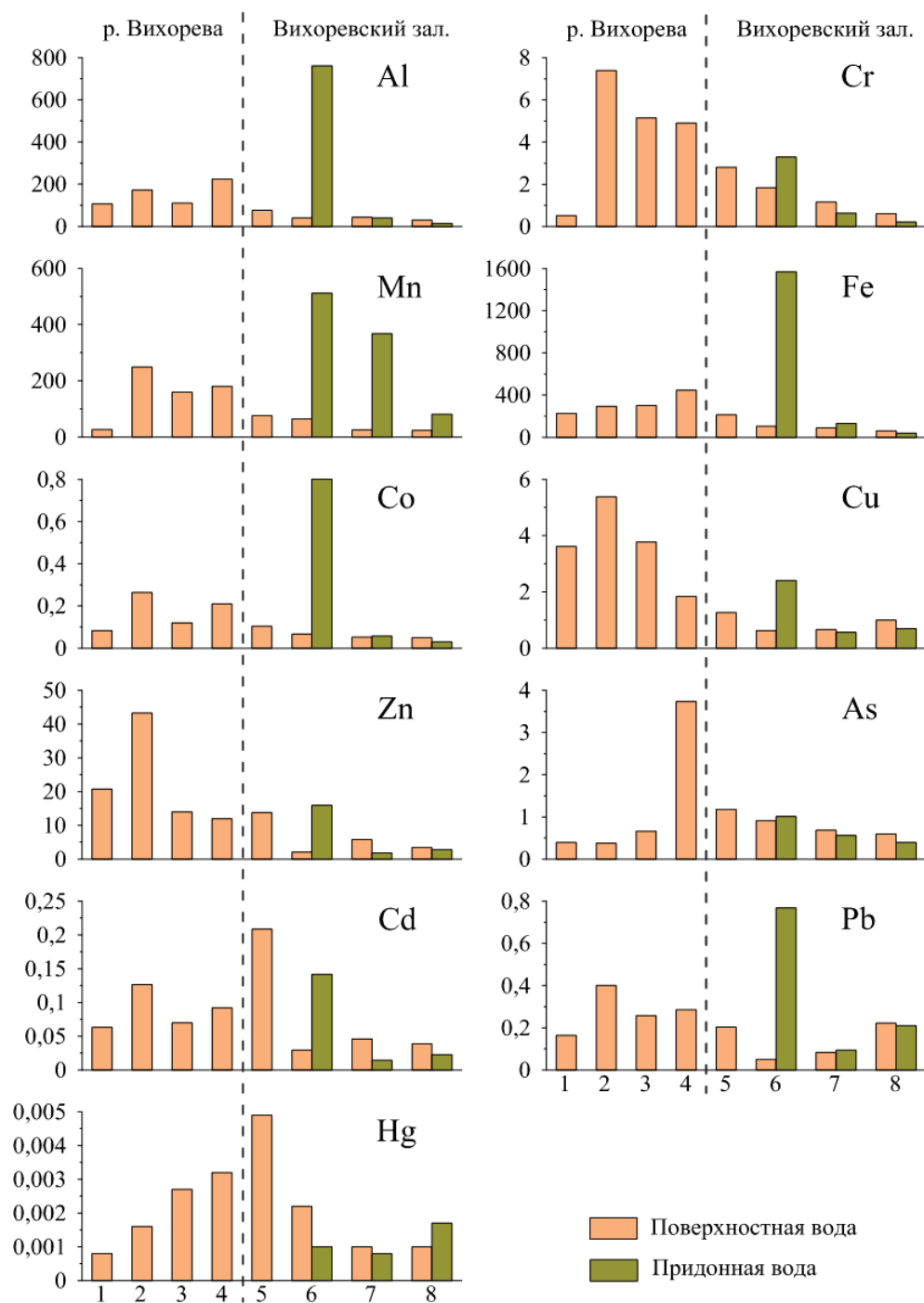


Рис. 4. Концентрации микроэлементов (мкг/л) в водах р. Вихорева и Вихоревского залива
Fig. 4. Concentrations of trace elements (μg/l) in the Vikhoreva river waters, Vikhorevsky bay

Таблица 2. Концентрации микроэлементов в Бурдойской части Вихоревского залива (мкг/л)
Table 2. Concentrations of trace elements in the Burdoy part of Vikhorevsky bay (μg/l)

Точки наблюдений Observation points	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
11	16,2	0,28	90,7	37,6	0,04	0,57	1,9	0,51	0,05	0,07	0,0010
12	13,3	0,19	36,2	27,0	0,07	0,53	2,4	0,53	0,05	0,09	0,0005
10	24,8	0,39	55,6	40,9	0,05	8,18	3,4	0,53	0,11	0,16	0,0022
9 (п)/(s)*	23,5	0,49	16,2	38,5	0,04	1,03	1,9	0,59	0,04	0,08	0,0021
9 (д)/(b)*	5,3	0,19	139,6	23,9	0,03	2,04	3,3	0,49	0,04	0,06	0,0010

* – п – поверхностная, д – придонная вода/s – surface, b – bottom water.

Таблица 3. Средние концентрации микроэлементов в водах р. Вихорева, Вихоревского залива, р. Ангары и ее водохранилищ (мкг/л)

Table 3. Average concentrations of trace elements in the waters of the Vikhoreva river, Vikhorevsky bay, Angara river and its reservoirs (µg/l)

Водный объект Water body	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Cu	Источник Source
р. Вихорева/Vikhoreva river	153,5	4,49	153,8	316,3	0,17	3,65	Настоящее исследование Present study
Вихоревская часть залива Vikhorevskaya part of the bay	143,3	1,51	164,3	314,7	0,17	1,03	
Бурдойская часть залива Bourdouy part of the bay	16,6	0,31	67,7	33,6	0,04	2,47	
Усть-Илимское водохранилище Ust-Ilimsk reservoir	10,2	0,79	9,0	–	–	1,55	[31]
Братское водохранилище Bratsk reservoir	12,9	0,19	22,9	22,4	–	0,84	[30]
Исток р. Ангары/Angara river source	1,86	0,08	2,72	2,96	0,01	0,56	[29]
ПДКпв/ПДКрбх MACpv/PCrbh	200/40	50/20	100/10	300/100	100/10	1000/1	[32]
	Zn	As	Cd	Pb	Hg		Источник Source
р. Вихорева/Vikhoreva river	22,5	1,29	0,088	0,28	0,0021		Настоящее исследование Present study
Вихоревская часть залива Vikhorevskaya part of the bay	6,5	0,76	0,072	0,23	0,0018		
Бурдойская часть залива Bourdouy part of the bay	2,6	0,53	0,058	0,09	0,0014		
Усть-Илимское водохранилище Ust-Ilimsk reservoir	9,2	–	–	1,2	–		[31]
Братское водохранилище Bratsk reservoir	3,8	0,37	0,023	0,11	0,0042		[30]
Исток р. Ангары/Angara river source	3,0	0,40	0,022	0,08	–		[29]
ПДКпв/ПДКрбх MACpv/PCrbh	5000/10	10/50	1/5	10/6	0,5/0,01		[32]

В воде условно фоновой для р. Вихорева станции (т.н. 1) концентрации Al (107,0 мкг/л), Fe (226,8 мкг/л), Cu (3,62 мкг/л) и Zn (20,7 мкг/л) уже значительно выше, чем в Усть-Илимском водохранилище. В материалах статистической отчетности по стокам, образованным в результате деятельности лесопромышленного и энергетического комплексов Братской промышленной зоны, а также хозяйственно-бытовых сточных вод г. Братска, приводятся данные только по количеству поступающего в воды р. Вихорева железа, фактический сброс которого в 1997 г. составил 161,5 т/год [10]. Через 20 лет его концентрация в промышленных стоках снизилась, сброс сократился до 24 т/год [11]. В период исследований концентрации Fe в воде т.н. 2 после поступления сточных вод возрастают незначительно (с 226,8 до 292,7 мкг/л) (рис. 4).

При отсутствии информации о количестве загрязняющих веществ, поступающих со сточными водами и диффузным стоком с промышленных зон, для оценки воздействия антропогенных источников используют сравнение концентраций загрязняющих веществ в воде незагрязненных (условно фоновых) и загрязненных участков водоема [31]. В большей степени сброс сточных вод оказывает влияние на увеличение в воде р. Вихорева концентраций Mn (в 10 раз) и Cr (в 14 раз), в меньшей степени – Al, Co, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg (до 3 раз). Кон-

центрации As не изменяются. На техногенное происхождение некоторых выделенных микроэлементов указывают также исследования, проведенные при изучении влияния Братской промышленной зоны на химический состав почв прилегающих к ней территорий [33]. Эти исследования показали, что выбросы БрАЗ приводят к поступлению в окружающую среду около 1300 т алюминия. К загрязняющим веществам лесопромышленного комплекса относятся Fe и Mn. Эти микроэлементы в значительных количествах находятся и в золе ТЭЦ-6. В почве вблизи промышленных предприятий г. Братска обнаружены повышенные концентрации Zn, Cu, Pb.

Результаты пространственного распределения микроэлементов по течению р. Вихорева показывают, что после поступления сточных вод последовательное снижение концентраций в водной среде характерно только для Cr, Zn, Cu. Концентрации Hg и As, напротив, увеличиваются. Распределение Al, Mn, Fe, Cd, Pb в воде реки неравномерно. Смешение вод р. Вихорева и Вихоревского залива (т.н. 5) приводит к уменьшению высоких концентраций Al, Cr, Mn, Fe, Cu, As, Pb в водной среде. Основным фактором самоочищения на этом участке является многократное разбавление загрязненных вод реки водами Вихоревского залива, формирующимися под влиянием вод русловой части Усть-

Илимского водохранилища. В отличие от главных ионов, характерной особенностью для большинства изучаемых микроэлементов является приуроченность их максимальных концентраций не к основному источнику техногенного загрязнения – стокам Братской промышленной зоны, а к акватории Вихоревского залива (рис. 4). В водах загрязненной реки определены только максимальные концентрации Cu, As, Cr и Zn. Самые высокие концентрации Al, Mn, Fe, Pb и Co зафиксированы в т.н. 6, Cd и Hg – в т.н. 5 Вихоревского залива.

Сравнительный анализ концентраций микроэлементов по глубине Вихоревского залива не выявил полученную для главных ионов закономерность, которая показала превышение концентрации последних в поверхностных водах над придонными. Напротив, при более равномерных концентрациях большинства микроэлементов в поверхностных слоях воды залива выделяются точки наблюдений, в которых определены их значительные концентрации в придонных слоях (рис. 4). Особенно в т.н. 6 Вихоревского залива, расположенной в 2 км ниже устья р. Вихорева.

В Бурдойском заливе увеличение концентраций большинства микроэлементов происходит от устьевых участков зал. Тада и зал. Бурдой к участку слияния Бурдойского и Вихоревского заливов (табл. 2). Так же как в Вихоревском, в придонных слоях воды Бурдойского залива концентрации Mn, Cu, Zn повышены, по сравнению с поверхностными.

Из рассматриваемых микроэлементов выделяется Mn, который в связи со значительным увеличением концентраций в р. Вихорева после поступления сточных вод является одним из основных микроэлементов техногенного происхождения. Его концентрации в придонных слоях (81,4–511,5 мкг/л) воды Усть-Вихоревского залива во всех точках наблюдений значительно выше, чем в поверхностных (16,2–76,2 мкг/л). Известно, что Mn при высоких положительных значениях Eh водной среды легко окисляется, переходит в нерастворимую форму и переносится в составе взвеси [34]. Миграция Mn может происходить с большим количеством взвешенных веществ, содержащихся в воде р. Вихорева. На участке смешения р. Вихорева и Вихоревского залива при уменьшении скорости течения поступающая с водой реки взвесь, содержащая гидроксиды Mn, Fe, Al и др. микроэлементов, начинает оседать, приводя к увеличению их концентраций в придонных слоях воды.

В водоемах, подверженных антропогенным нагрузкам, за счет адсорбции, соосаждения и гидролиза только небольшая часть потенциально опасных микроэлементов растворяется в водной среде, их значительная часть накапливается в донных отложениях [35, 36]. Формирование донных

отложений Вихоревского залива происходило в экстремальных условиях непрерывного поступления огромных количеств загрязняющих веществ как органического, так и неорганического происхождения. Ранее результаты исследования химического состава донных отложений Усть-Илимского водохранилища [37] выделили Вихоревский залив как аномальную зону, в которой депонируются вещества техногенного происхождения, поступающие в р. Вихорева со сточными водами Братской промышленной зоны. В представленной работе концентрации Mn, Al, Fe в донных отложениях не рассматриваются. Вместе с этим в донных отложениях района т.н. 6 определены самые высокие для всего Усть-Илимского водохранилища концентрации Zn, Co, As, Pb, Cd, Hg и повышенные Cr и Cu. Известно, что при изменении гидрологических условий водохранилища донные отложения могут являться мощным источником вторичного загрязнения не только водной среды, но и всей экосистемы водоема [38, 39]. В связи с этим высокие концентрации Mn, а также Al, Fe, Zn, Cu, Cd и Pb в придонной воде Вихоревского и Бурдойского заливов указывают на их вторичное поступление из загрязненных донных отложений.

Корреляционный анализ

При выделении природных и антропогенных факторов формирования гидрохимического состава идентификацию основных источников поступления элементов в водные объекты проводят с использованием статистических методов, в частности определением коэффициентов корреляции и применением факторного анализа [40]. Результаты корреляционного матрицы, позволившей оценить взаимосвязь концентраций микроэлементов с главными ионами, растворенным кислородом и Сорг в воде р. Вихорева и Усть-Вихоревского залива, суммированы в табл. 4. Выделение факторов, объединивших между собой параметры гидрохимического состава, проведено с помощью многомерного факторного анализа (рис. 5).

Результаты корреляционного анализа между основными ионами показали, что для вод р. Вихорева достоверную положительную корреляцию, указывающую на наличие общего источника поступления, имеют SO_4^{2-} с HCO_3^- ($r=0,91, p<0,01$), Na^+ ($r=0,89, p<0,01$) и K^+ ($r=0,96, p<0,01$), Na^+ с Cl^- ($r=0,94, p<0,01$). И если корреляционные связи сульфат-ионов, ионов хлора, натрия и калия логично объясняются поступлением этих компонентов со сточными водами Братской промышленной зоны, то взаимосвязь сульфат- и гидрокарбонат-ионов обусловлена природными факторами формирования гидрохимического состава, выделенными для вод р. Вихорева (подземные воды и состав пород бассейна реки).

Техногенное происхождение микроэлементов в воде р. Вихорева достоверно показывает их коэффициенты корреляции с главными для предприятий деревоперерабатывающей промышленности загрязнителями (табл. 4). В большей степени это корреляционные зависимости между Cl^- , Na^+ и Mn ($r=0,99$ и $r=0,97, p<0,01$), Cl^- , Na^+ и Cr ($r=0,98, r=0,94, p<0,01$), Cl^- , Na^+ и Pb ($r=0,93$ и $r=0,90, p<0,01$). Факторный анализ выделил большую группу элементов (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Al , Cr , Mn , Fe , Co , Cd , Pb , Hg , Copr), объединенную Фактором 1 (рис. 5, А). Для р. Вихорева фактор 1 является наиболее значимым (доля общ. 64 %) и отражает вклад техногенной составляющей в ее гидрохимический состав. Вместе с этим в пределах Фактора 1 можно выделить две группы. В первую группу объединяются элементы, которые имеют в большей степени техногенное происхождение: Cl^- , Na^+ , K^+ , Cr , Mn , Co , Pb и Copr . Во вторую – элементы как техногенного, так и природного происхождения: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Al , Fe , Hg . Такое выделение групп соответствует результатам пространственного распределения основных ионов и микроэлементов, которое показало, что на концентрации HCO_3^- и SO_4^{2-} в воде реки, помимо стоков Братской промышленной зоны, оказывает влияние субаквальная разгрузка подземных вод. Микроэлементный состав подземных вод, разгружающихся в долину р. Вихорева, не изучен. Поэтому коэффициенты корреляции микроэлементов с гидрокарбонат-ионом, который не относится к основным загрязняющим веществам Братской промышленной зоны, но является основным компонентом сульфатно-гидрокарбонатных подземных вод, определяют природные источники их поступления. Значимые положительные коэффициенты корреляции HCO_3^- определены с As ($r=0,94, p<0,01$), Hg

($r=0,95, p<0,01$), а также Fe ($r=0,99, p<0,01$). Концентрации Fe , относящегося к специфичным загрязнителям Братской промышленной зоны [10, 11], после поступления сточных вод незначительно повышаются в воде р. Вихорева, достигая наибольших значений в устье реки.

В Усть-Вихоревском заливе взаимосвязь между главными ионами близка к функциональной ($r=0,87-0,99, p<0,01$). Корреляционные зависимости между микроэлементами и главными ионами значительно ослабевают (табл. 4). Из рассматриваемых микроэлементов только Cr и Hg достоверно взаимосвязаны с SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , а также As , коррелирующий с компонентами основного ионного состава. В Усть-Вихоревском заливе взаимосвязи между изучаемыми компонентами определены 2 факторами (рис. 5, Б). Фактор 1 (доля общ. 51 %) объединяет между собой главные ионы, а также Cr , Zn и Copr , Фактор 2 (доля общ. 24 %) – Mn , Fe , Al , Pb , Co . Фактором 1 объединена ассоциация компонентов, распределение которых сходно при смешении вод загрязненной реки и формирующих Вихоревский и Бурдойский заливы вод русловой части Усть-Илимского водохранилища. Фактор 2 выделил элементы с переменной валентностью – Mn и Fe . Концентрация этих элементов в водной среде значительно зависит от смены окислительно-восстановительных условий, приуроченных к границе вода–донные отложения и определяющих процессы разложения органического вещества, накопленного в донных отложениях за длительный период техногенной эмиссии. Выделенные Фактором 2 в одну группу Mn , Fe , а также Al , Pb и Co являются микроэлементами, поступающими из высокозагрязненных донных отложений в водную среду.

Таблица 4. Значимые коэффициенты корреляции ($p<0,01$) в воде р. Вихорева и Усть-Вихоревском заливе

Table 4. Significant correlation coefficients ($p<0.01$) in the water of the Vikhoreva river and Ust-Vikhorevsky bay

Элемент Element	Коэффициент корреляции Correlation coefficient	
	р. Вихорева/Vikhoreva river	Усть-Вихоревский залив/Ust-Vikhorevsky bay
Al	(+)* SO_4^{2-} , Fe ; (–) Ca , O_2	(+) Cr , Mn , Fe , Co , Zn , Pb
Cr	(+) Cl^- , Na^+ , Mn , Pb	(+) SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Al , Fe , Co , Zn , As , Cd
Mn	(+) Cl^- , Na^+ , K^+ , Cr , Co , Pb , Copr .	(+) Al , Fe , Co , Pb ; (–): O_2
Fe	(+) HCO_3^- , SO_4^{2-} , Al , As ; (–) Ca , O_2	(+) Al , Cr , Mn , Co , Zn , Pb ; (–): O_2
Co	(+) Na^+ , Mn , Cd , Pb , Copr .	(+) Al , Cr , Mn , Fe , Zn , Pb ; (–): O_2
Cu	(–) Mg^{2+}	(–) Mg^{2+}
Zn	**	(+) Al , Cr , Fe , Co , As , Cd , Pb
As	(+) HCO_3^- , Fe ; (–) Ca^{2+}	(+) HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cr , Zn , Cd
Cd	(+) Co , Pb , Copr .	(+) Cr , Zn , As
Pb	(+) Cl^- , Na^+ , Cr , Mn , Co , Cd , Copr .	(+) Al , Mn , Fe , Co , Zn
Hg	(+) HCO_3^-	(+) SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+

* – (+) – положительная корреляция, (–) – отрицательная корреляция, ** – нет значимых корреляций.

* – (+) – positive correlation, (–) – negative correlation, ** – no significant correlations.

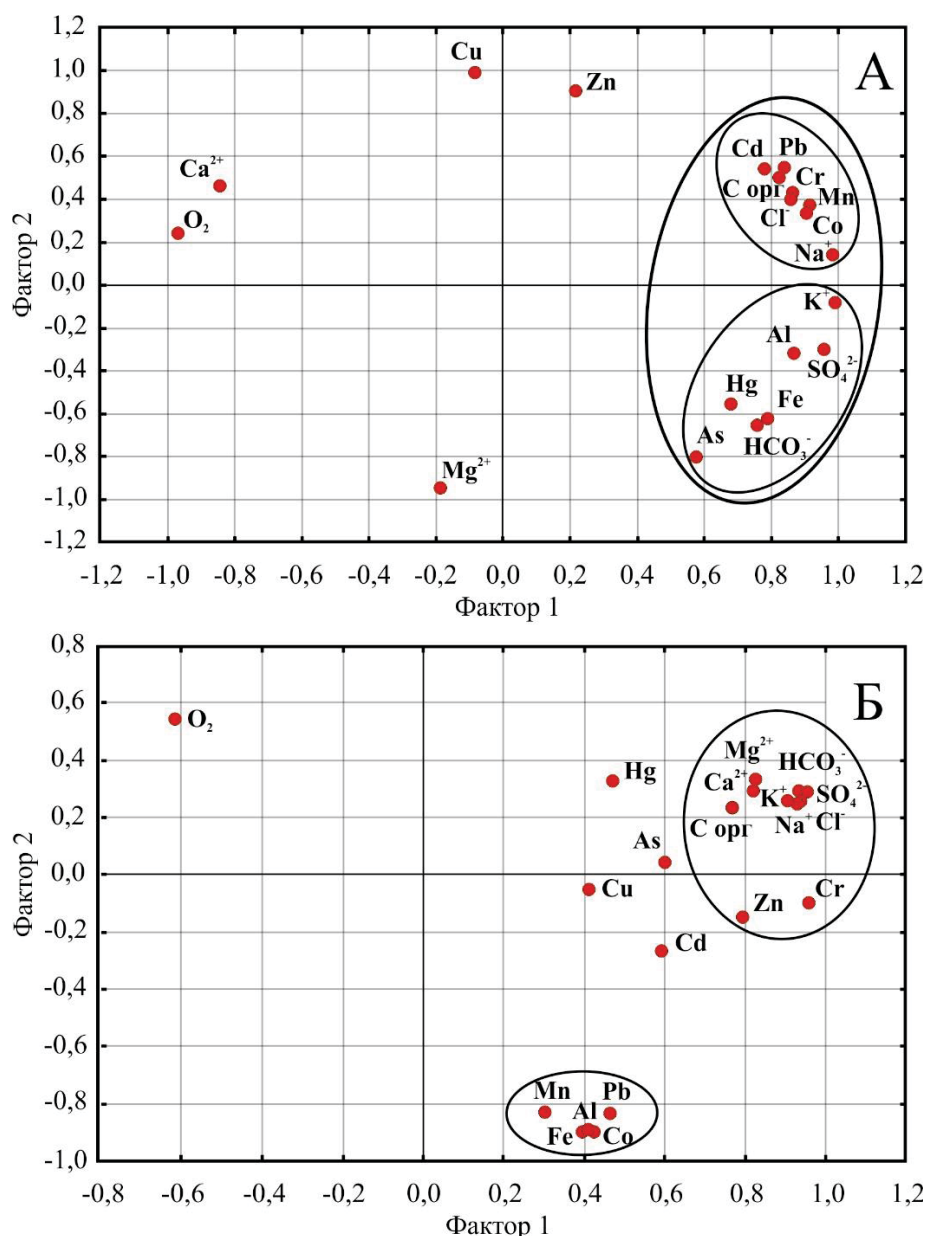


Рис. 5. Факторный анализ концентраций главных ионов, микроэлементов, растворенного кислорода и Corg в водах р. Вихорева (А) и Усть-Вихоревского залива (Б)

Fig. 5. Factor analysis of the concentrations of major ions, trace elements, dissolved oxygen and Corg in the waters of the Vikhoreva river (A) and Ust-Vikhorevsky bay (B)

Закключение

Исследования, проведенные в р. Вихорева и Усть-Вихоревском заливе Усть-Илимского водохранилища, позволили выделить основные особенности гидрохимического режима водоемов, в значительной степени подверженных антропогенной нагрузке. Помимо кислородного режима и режима главных ионов, впервые определен микроэлементный состав вод высок загрязненной реки и залива, формирование которого происходило под высоким техногенным прессом. Результаты исследования показали, что, несмотря на снижение техногенной нагрузки, загрязнение, связанное с поступлением

сточных вод Братской промышленной зоны в р. Вихорева, продолжается. После поступления сточных вод происходит обогащение вод реки, в большей степени SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Cr , Mn , Co , Pb и Corg. Чрезвычайно низкие концентрации O_2 , определенные в воде реки, создают неблагоприятные условия для местной флоры и фауны. Помимо антропогенного фактора, на формирование режима главных ионов и микроэлементов в воде р. Вихорева большое влияние оказывает субаквальная разгрузка подземных вод, влияющая на концентрацию, в основном HCO_3^- , SO_4^{2-} , Al , Fe и Hg .

Поступление загрязненных вод р. Вихорева оказывает воздействие на гидрохимический состав Усть-Вихоревского залива: весь Вихоревский залив и устьевая часть Бурдойского залива. В поверхностных водах заливов зафиксированы концентрации кислорода удовлетворительные для обитания гидробионтов, в придонных водах Вихоревского залива концентрации кислорода значительно ниже установленных нормативов. Уменьшение концентраций главных ионов и микроэлементов, поступающих с р. Вихорева, в воде Усть-Вихоревского залива связано в первую очередь с разбавлением высокозагрязненных вод реки водами русловой части Усть-Илимского водохранилища. При этом распределение главных ионов и микроэлементов в водной толще залива неоднородно. Концентрации главных

ионов в поверхностных водах выше, чем в придонных. Увеличение концентраций микроэлементов, в основном Mn, Fe, Al, Pb и Co, в придонных водах, по сравнению с поверхностными, указывает на вторичное загрязнение экосистемы залива, связанное с долговременной аккумуляцией в донных отложениях веществ антропогенного происхождения.

Привнос в водоемы веществ техногенного происхождения с промышленными стоками, их накопление в донных осадках и последующее вторичное поступление в водную среду создают неблагоприятные условия для жизнедеятельности гидробионтов. В связи с этим впервые полученные данные по микроэлементному составу вод могут рассматриваться как отправная точка для дальнейшего мониторинга загрязнения всей пресноводной экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Herail geochemistry of Chilean rivers within the central zone: distinguishing the impact of mining, lithology and physical weathering / J. Viers, S. Carretier, Y. Auda, O.S. Pokrovsky, P. Seyler, F. Chabaux, V. Regard, V. Tolorza, G. Herail // *Aquatic Geochemistry*. – 2019. – Vol. 25. – P. 27–48. DOI: 10.1007/s10498-019-09350-1.
2. Hydro chemical characteristics and human health risk assessment of surface water in the Danjiang river source basin of the middle route of China's south-to-north water transfer project / L. Lin, Y. Zhang, X. Qian, Y. Wang // *Water* – 2023. – Vol. 25. – 2203. DOI: 10.3390/w15122203.
3. Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters // *Treatise Geochemistry*. – 2003. – Vol. 5. – P. 605. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/05165-3.
4. Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk / N. Saha, M.S. Rahman, M.B. Ahmed, J.L. Zhou, H.H. Ngo, W. Guo // *J. Environ. Manag.* – 2017. – Vol. 185. – P. 70–78. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.10.023.
5. Моисеенко Т.И. Биодоступность и экотоксичность металлов в водных системах: критические уровни загрязнения // *Геохимия*. – 2019. – Т. 64. – № 7. – С. 675–688. DOI: 10.31857/S0016-7525647675-688.
6. Kaur J., Kaur V., Pakade Y.B. A study on water quality monitoring of Buddha Nullah, Ludhiana, Punjab (India) // *Environ Geochem Health*. – 2021. – Vol. 43. – P. 2699–2722. DOI: 10.1007/s10653-020-00719-8.
7. Risk assessment of dissolved trace elements and heavy metals in the upper reaches of the Yangtze river, China / Y. Chen, F. Xiong, D. Zhai, H. Liu, X. Duan, D. Chen, W. Jiang, B. Li // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – 1330. DOI: 10.3390/w15071330.
8. Влияние крупных притоков на содержание тяжелых металлов в воде и донных отложениях реки Амур / Л.М. Кондратьева, В.С. Канцыбер, В.Е. Зазулина, Л.С. Боковенко // *Тихоокеанская геология*. – 2006. – Т. 25. – № 6. – С. 103–114.
9. Global Biogeochemical Implications of mercury discharges from rivers and sediment burial / H. Amos, D. Jacob, D. Kocman, H. Horowitz, Y. Zhang, S. Dutkiewicz, M. Horvat, E. Corbitt, D. Krabbenhoft, E. Sunderland // *Environmental Science and Technology*. – 2014. – Vol. 48 (16). – P. 9514–9522. DOI: 10.1021/es502134t
10. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 1997 году» / под ред. Ю.Н. Удодова. – Иркутск: Облмашинформ, 1999. – 299 с.
11. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2016 году» / под ред. А.В. Крючкова. – Иркутск: ООО «Мегапринт», 2017. – 274 с.
12. Про ЧП на реке Вихорева из официальных источников // Братский городской сайт. – Братск, Россия, 2015. URL: <https://bratsk.org/2015/07/02/About-the-state-of%20-emergency-on-the-rive-Vihoerva-from-official-sources?ysclid=llkn77w3ti564970284> (дата обращения 15.11.2023).
13. Рыба погибла. В Братске возбудили уголовное дело из-за сброса химикатов в реку // Иркутск онлайн. – Иркутск, Россия, 2022. URL: <https://ircity.ru/text/ecology/2022/06/02/71379038/?ysclid=llkmlm2rux845167091> (дата обращения 15.11.2023).
14. Стрижева Т.А. Условия и особенности формирования гидрохимического режима, состава и качества вод искусственных водоемов Восточной Сибири (на примере Усть-Илимского водохранилища). дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 1985. – 211 с.
15. Варданян М.А., Яблокова И.А. Результаты гидрохимического мониторинга вод р. Вихоревой за 2010–2013 гг. // *Труды БрГУ. Серия: Естественные и инженерные науки*. 2014. – Т. 1. – С. 362–366.
16. Полетаева В.И., Долгих П.Г., Пастухов М.В. Особенности формирования гидрохимического режима Усть-илимского водохранилища // *Вода: химия и экология*. – 2017. – № 10. – С. 11–17.
17. Долгих П.Г., Полетаева В.И. Распределение биогенных элементов в воде р. Вихорева и Вихоревского залива Усть-Илимского водохранилища при техногенном воздействии // *Вопросы естествознания*. – 2018. – № 3 (17). – С. 58–63.
18. Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirsikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region, Russia // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 321:012041. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012041.
19. Changes in water hydrochemistry in bays of the Bratsk Reservoir caused by forest harvesting operations / V.I. Poletaeva, M.V. Pastukhov, N.A. Zagorulko, G.A. Belogolova // *Water Resources*. – 2018. – Vol. 45 (3). – P. 369–378. DOI: 10.1134/S0097807818030119.

20. Магомедов М.М. Природа Усть-Илимского района / под ред. Л.М. Корытного. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003. – 143 с.
21. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши: ч. 1 / под ред. Л.В. Боевой. – Ростов-на-Дону: НОК, 2009. – 1044 с.
22. Chapra S.C., Camacho L.A., McBride G.B. Impact of global warming on dissolved oxygen and BOD assimilative capacity of the world's rivers: modeling analysis // *Water*. – 2021. – Vol. 13. – 2408. DOI: 10.3390/w13172408.
23. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / под ред. Л.К. Исаева. – СПб: Эколого-аналитический информационный центр «Союз», 1998. – 896 с.
24. Vaquer-Sunyer R., Duarte C.M. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity // *Proc. Natl Acad. Sci. USA* – 2008. – Vol. 105. – P. 15452–15457. DOI: 10.1073/pnas.0803833105.
25. Шенькман Б.М. Гидрохимическая зональность и формирование химического состава подземных вод // Усть-Илимское водохранилище. Подземные воды и инженерная геология территории. – Новосибирск: Наука, 1975. – С. 45–84.
26. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River) / J. Chen, F. Wang, X. Xia, L. Zhang // *Chemical Geology* – 2002. – Vol. 187. – P. 231–255. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00032-3.
27. Li S., Ye C., Zhang Q. 11-year change in water chemistry of large freshwater Reservoir Danjiangkou, China // *Journal of Hydrology* – 2017. – Vol. 551. – P. 508–517. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.058.
28. Моисеенко Т.И. Оценка качества вод и «здоровья» экосистем с позиций экологической парадигмы // *Водное хозяйство России*. – 2017. – № 3. – С. 104–124.
29. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Dolgikh P.G. Trace element compositions and water quality assessment in the Angara river source (Baikal region, Russia) // *Water*. – 2022. – Vol. 14. – 3564. DOI: 10.3390/w14213564.
30. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Tirsikh E.N. Dynamics of trace element composition of Bratsk reservoir water in different periods of anthropogenic impact (Baikal region, Russia) // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2021. – Vol. 80. – P. 531–545. DOI: 10.1007/s00244-021-00819-1
31. Карнаухова Г.А. Гидрохимия Ангары и водохранилищ Ангарского каскада // *Водные ресурсы*. – 2008. – Т. 35. – № 1. – С. 72–80.
32. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Утверждены Постановлением от 28 января 2021 г. № 2. Зарегистрировано в Минюсте России 29 января 2021 г. № 62296. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации, 2021. – 1025 с.
33. Рунова Е.М., Чжан С.А., Пузанова О.А. Воздействие загрязняющих веществ на почву в районе города Братска // *Лесной вестник*. – 2008. – № 1. – С. 148–151.
34. Pokrovsky O.S., Schott J., Dupre B. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil pore waters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 2006. – Vol. 70. – P. 3239–3260. DOI: 10.1016/j.gca.2006.04.008.
35. Identification and apportionment of hazardous elements in the sediments in the Yangtze River estuary / J. Wang, R. Liu, H. Wang, W. Yu, F. Xu, Z. Shen // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2015. – Vol. 22. – P. 20215–20225. DOI: 10.1007/s11356-015-5642-9.
36. Source identification and ecological risk of potentially harmful trace elements in lacustrine sediments from the middle and lower reaches of Huaihe river / M. Xu, R. Wang, W. Sun, D. Wang, X. Wu // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – 544. DOI: 10.3390/w15030544.
37. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Dolgikh P.G. Geochemical characteristics of microelement distribution in surface sediments of Ust-Ilimsk Reservoir // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 321:012042. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012042.
38. Arnason J.G., Fletcher B.A. A 40+ year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition in sediments of Patroon Reservoir, Albany County, NY, USA // *Environ. Pollut.* – 2003. – Vol. 123. – P. 383–391. DOI: 10.1016/S0269-7491(03)00015-0.
39. Arsenic pollution of sediments in China: an assessment by geochemical baseline / L.F. Han, B. Gao, H. Hao, J. Lu, D.Y. Xu // *Sci. Total Environ.* – 2019. – Vol. 651. – P. 1983–1991. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.381.
40. Applying chemical and statistical analysis methods to evaluate water and stream sediments around the coal mine area in Dazhu, China / D. Deng, Y. Wu, B. Ren, H. Yin // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – 1421. DOI: 10.3390/w15071421.

Информация об авторах

Павел Геннадьевич Долгих, младший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А. pdolgikh@igc.irk.ru

Вера Игоревна Полетаева, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А. alieva@igc.irk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3139-5864>

Михаил Владимирович Пастухов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А. mpast@igc.irk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1078-7145>

Поступила в редакцию: 28.12.2023

Поступила после рецензирования: 15.01.2024

Принята к публикации: 21.02.2024

REFERENCES

- Viers J., Carretier S., Auda Y., Pokrovsky O.S., Seyler P., Chabaux F., Regard V., Tolorza V., Hearail G. Herail geochemistry of Chilean rivers within the central zone: distinguishing the impact of mining, lithology and physical weathering. *Aquatic Geochemistry*, 2019, vol. 25, pp. 27–48. DOI: 10.1007 / s10498-019-09350-1.
- Lin L., Zhang Y., Qian X., Wang Y. Hydro chemical characteristics and human health risk assessment of surface water in the Danjiang river source basin of the middle route of China's south-to-north water transfer project. *Water*, 2023, vol. 25, 2203. DOI: 10.3390/w15122203.
- Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters. *Treatise Geochemistry*, 2003, vol. 5, pp. 605. DOI: 10.1016 /B0-08-043751-6/05165-3.
- Saha N., Rahman M.S., Ahmed M.B., Zhou J.L., Ngo H.H., Guo W. Industrial vmetal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk. *J. Environ. Manag.*, 2017, vol. 185, pp. 70–78. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.10.023.
- Moiseenko T.I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aquatic systems: critical levels of pollution. *Geochemistry*, 2019, vol. 64, no. 7, pp. 675–688. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016-7525647675-688.
- Kaur J., Kaur V., Pakade Y.B. A study on water quality monitoring of Buddha Nullah, Ludhiana, Punjab (India). *Environ Geochem Health*, 2021, vol. 43, pp. 2699–2722. DOI: 10.1007/s10653-020-00719-8.
- Chen Y., Xiong F., Zhai D., Liu H., Duan X., Chen D., Jiang W., Li B. Risk assessment of dissolved trace elements and heavy metals in the upper reaches of the Yangtze river, China. *Water*, 2023, vol. 15, 1330. DOI: 10.3390/w15071330.
- Kondratyeva L.M., Kantsyber V.S., Zazulina V.E., Bokovenko L.S. Influence of large tributaries on the content of heavy metals in water and bottom sediments of the Amur River. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2006, vol. 25, no. 6, pp. 103–114. (In Russ.)
- Amos H., Jacob D., Kocman D., Horowitz H., Zhang Y., Dutkiewicz S., Horvat M., Corbitt E., Krabbenhoft D., Sunderland E. Global biogeochemical implications of mercury discharges from rivers and sediment burial. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48, no. 16, pp. 9514–9522. DOI: 10.1021/es502134t
- State report «On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 1997». Irkutsk, Oblmashinform Publ. house, 1999. 299 p. (In Russ.)
- State report «On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2013». Irkutsk, OOO «Megaprint» Publ. house, 2017. 274 p. (In Russ.)
- About the emergency on the Vihoreva river from official sources. *Bratsk State Website*. (In Russ.) Available at: <https://bratsk.org/2015/07/02/About-the-state-of%20-mergency-on-the-rive-Vihoerva-from-official-sources?ysclid=llkn77w3ti564970284> (accessed 15 November 2023).
- The fish died. A criminal case was opened in Bratsk because of dumping chemicals into the river. *Irkutsk online*. 2022. (In Russ.) Available at: <https://ircity.ru/text/ecology/2022/06/02/71379038/?ysclid=llkmlm2rux845167091> (accessed 15 November 2023).
- Strizheva T.A. *Conditions and features of the formation of the hydrochemical regime, composition and quality of water in artificial reservoirs of Eastern Siberia (using the example of the Ust-Ilmsk reservoir*. Cand. Diss. Irkutsk, 1985. 211 p. (In Russ.)
- Vardanyan M.A., Yablokova I.A. Results of hydrochemical monitoring of river waters Vikhoreva for 2010–2013. *Trudy BrGU. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2014, vol. 1, pp. 362–366. (In Russ.)
- Poletaeva V.I., Dolgikh P.G., Pastukhov M.V. Features of the formation of the hydrochemical regime of the Ust-Ilmsk reservoir. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2017, no. 10, pp. 11–17. (In Russ.)
- Dolgikh P.G., Poletaeva V.I. Distribution of nutrients in river water. Vikhorev and Vikhorevsky Bay of the Ust-Ilmsk Reservoir under technogenic impact. *Voprosy estestvoznaniya*, 2018, no. 3 (17), pp. 58–63. (In Russ.)
- Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirsikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region, Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 321:012041. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012041.
- Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Zagorulko N.A., Belogolova G.A. Changes in water hydrochemistry in bays of the Bratsk reservoir caused by forest harvesting operations. *Water Resources*, 2018, vol. 45 (3), pp. 369–378. DOI: 10.1134/S0097807818030119.
- Magomedov M.M. *Nature of the Ust-Ilmsk District*. Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ. house, 2003. 143 p. (In Russ.)
- Manual of chemical analysis of terrestrial surface waters: P. 1*. Ed. by L.V. Boevaya. Rostov on Don, NOK Publ., 2009. 1044 p.
- Chapra S.C., Camacho L.A., McBride G.B. Impact of global warming on dissolved oxygen and BOD assimilative capacity of the world's rivers: modeling analysis. *Water*, 2021, vol. 13, 2408. DOI: 10.3390/w13172408.
- Control of chemical and biological environmental parameters*. Ed. by L.K. Isaev. St Petersburg, Environmental Analytical Information Center "Soyuz" Publ., 1998. 896 p.
- Vaquier-Sunyer R., Duarte C.M. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 2008, vol. 105, pp. 15452–15457. DOI: 10.1073/pnas.0803833105.
- Shenkman B.M. Hydrochemical zoning and formation of groundwater chemical composition. *Podzemnye vody i inzhenernaya geologiya territorii*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975. pp. 45–84.
- Chen J., Xia X., Zhang L. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River). *Chemical Geology*, 2002, vol. 187, pp. 231–255. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00032-3.
- Li S., Ye C., Zhang Q. 11-Year change in water chemistry of large freshwater Reservoir Danjiangkou, China. *Journal of Hydrology*, 2017, vol. 551, pp. 508–517. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.058.
- Moiseenko T.I. Assessment of water quality and the “health” of ecosystems from the perspective of the ecological paradigm. *Vodnoe khozyaystvo Rossii*, 2017, no. 3, pp. 104–124. (In Russ.)
- Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Dolgikh P.G. Trace element compositions and water quality assessment in the Angara river source (Baikal region, Russia). *Water*, 2022, vol. 14, 3564. DOI: 10.3390/w14213564.

30. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Tirsikh E.N. Dynamics of trace element composition of Bratsk reservoir water in different periods of anthropogenic impact (Baikal region, Russia). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, vol. 80, pp. 531–545. DOI: 10.1007/s00244-021-00819-1
31. Karnaukhova G.A. Hydrochemistry of the Angara and reservoirs of the Angara cascade. *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 1, pp. 71–79. (In Russ.)
32. *Sanitary norms and rules of Russian Federation 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans*. Approved by Resolution No. 2 of January 28, 2021. Moscow, Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare. Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation Publ., 2021. 1025 p. (In Russ.)
33. Runova E.M., Chzhan S.A., Puzanova O.A. Impact of pollutants on soil in the Bratsk city area. *Lesnoy vestnik*, 2008, no. 1, pp. 148–151. (In Russ.)
34. Pokrovsky O.S., Schott J., Dupre B. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil pore waters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2006, vol. 70, pp. 3239–3260. DOI: 10.1016/j.gca.2006.04.008.
35. Wang J., Liu R., Wang H., Yu W., Xu F., Shen Z. Identification and apportionment of hazardous elements in the sediments in the Yangtze River estuary. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 2015, vol. 22, pp. 20215–20225. DOI: 10.1007/s11356-015-5642-9.
36. Xu M., Wang R., Sun W., Wang D., Wu X. Source identification and ecological risk of potentially harmful trace elements in lacustrine sediments from the middle and lower reaches of Huaihe River. *Water*, 2023, vol. 15, 544. DOI: 10.3390/w15030544.
37. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Dolgikh P.G. Geochemical characteristics of microelement distribution in surface sediments of Ust-Ilimsk Reservoir. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 321:012042. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012042.
38. Arnason J.G., Fletcher B.A. A 40+ year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition in sediments of Patroon Reservoir, Albany County, NY, USA. *Environ. Pollut*, 2003, vol. 123, pp. 383–391. DOI: 10.1016 /s0269-7491(03)00015-0.
39. Han L.F., Gao B., Hao H., Lu J., Xu D.Y. Arsenic pollution of sediments in China: an assessment by geochemical baseline. *Sci. Total Environ*, 2019, vol. 651, pp. 1983–1991. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.381.
40. Deng D., Wu Y., Ren B., Yin H. Applying chemical and statistical analysis methods to evaluate water and stream sediments around the coal mine area in Dazhu, China. *Water*, 2023, vol. 15, 1421. DOI: 10.3390/w15071421.

Information about the authors

Pavel G. Dolgikh, Junior Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1 «A», Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russian Federation. pdolgikh@igc.irk.ru

Vera I. Poletaeva, Cand. Sc., Senior Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1 «A», Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russian Federation. alieva@igc.irk.ru

Mikhail V. Pastukhov, Cand. Sc., Senior Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1 «A», Favorsky street, Irkutsk 664033, Russian Federation. mpast@igc.irk.ru

Received: 28.12.2023

Revised: 15.01.2024

Accepted: 21.02.2024