

УДК 556.114.7

## Химический состав поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки (на примере малых водоемов Томского района)

Д. И. Чуйкина, И. С. Король\*, Н. А. Мухортина

\*Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Томск, Россия;

e-mail: [irinakorol@yandex.ru](mailto:irinakorol@yandex.ru), ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

### Информация о статье    Реферат

Поступила  
в редакцию  
17.12.2025;

получена  
после доработки  
20.02.2026;

принята  
к публикации  
24.02.2026

### Ключевые слова:

поверхностные воды,  
ионный состав,  
полиароматические  
углеводороды,  
антропогенная нагрузка,  
индекс загрязненности  
воды,  
гидрохимические  
показатели,  
малые озера

Оценка состояния природных вод требует комплексного подхода, включающего определение широкого спектра физико-химических показателей, на основе которых разрабатываются специализированные индексы и классификации. Традиционные методы анализа не всегда учитывают влияние ряда загрязняющих веществ, таких как полиароматические углеводороды (ПАУ), которые могут оказывать значительное воздействие на экосистемные процессы и качество водной среды. В работе представлены результаты исследований малых озер Томского района (Томская обл.), испытывающих влияние антропогенной деятельности и представляющих собой пресноводные водоемы с показателями электропроводности не более 0,34 мСм/см, значениями pH до 7,2. Содержание неорганических макрокомпонентов (катионов и анионов) не превышает предельно допустимых концентраций (ПДК), что свидетельствует об удовлетворительном химическом составе воды. Детально проанализировано содержание фотопигментов в донных отложениях. Для всех исследованных образцов зафиксирован широкий диапазон концентраций хлорофилла а от 0,35 до 2,3 мкг/г, что может быть обусловлено неоднородностью пространственного распределения фитопланктона и трофическим статусом водоемов. Детально исследовано индивидуальное и суммарное содержание тринадцати приоритетных ПАУ в поверхностных водах. Их суммарные концентрации варьируются от 0,37 до 0,54 мкг/л, что указывает на наличие умеренного уровня загрязнения; в составе преобладают нафталин, флуорен, фенантрен и бенз[а]антрацен, обладающие способностью к биоаккумуляции. На основании полученных данных рассчитан индекс загрязненности воды (ИЗВ), который показал, что все исследованные озера относятся к категории умеренно загрязненных, приближаясь к границе с загрязненными водоемами. Проведенное исследование позволило оценить влияние антропогенного воздействия на химический состав поверхностных вод малых водоемов Томского района. Особое внимание уделено роли полиароматических углеводородов в формировании экологического состояния водных объектов и их вкладу в изменение значений индекса загрязнения вод. Полученные результаты демонстрируют значимость подобных исследований для мониторинга и охраны водных экосистем.

### Для цитирования

Чуйкина Д. И. и др. Химический состав поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки (на примере малых водоемов Томского района). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 75–89. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-75-89>.

## Chemical composition of surface water under anthropogenic load (on the example of small reservoirs in the Tomsk region)

Daria I. Chuikina, Irina S. Korol\*, Natalia A. Mukhortina

\*Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk Department, Tomsk, Russia;  
e-mail: irinakorol@yandex.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

### Article info

Received  
17.12.2025;  
received  
in revised form  
20.02.2026;  
accepted  
24.02.2026

### Abstract

Assessment of the natural waters' state requires an integrated approach including the determination of a wide range of physico-chemical parameters, on the basis of which specialized indexes and classifications are developed. Traditional analysis methods do not always take into account the effects of a number of pollutants, such as polyaromatic hydrocarbons (PAHs), which can have a significant impact on ecosystem processes and the quality of the aquatic environment. The paper presents the results of studies of small lakes in the Tomsk district (Tomsk region) affected by anthropogenic activity, which are freshwater reservoirs with electrical conductivity values of no more than 0.34 ms/cm, pH values up to 7.2. The content of inorganic macro components (cations and anions) does not exceed the maximum permissible concentrations (MPC), which indicates a satisfactory chemical composition of the water. The content of photopigments in bottom sediments has been analyzed in detail. A wide range of chlorophyll a concentrations from 0.35 to 2.3 µg/g has been recorded for all the studied samples, which may be due to the heterogeneity of the spatial distribution of phytoplankton and the trophic status of reservoirs. The individual and total content of 13 priority PAHs in surface waters has been studied in detail. Their total concentrations range from 0.37 to 0.54 µg/l, which indicates the presence of a moderate level of contamination; naphthalene, fluorene, phenanthrene and benz[a]anthracene predominate in the composition, which have the ability to bioaccumulate. Based on the data obtained, the water pollution index (WPI) has been calculated showing that all the lakes studied belong to the category of moderately polluted, approaching the border with polluted reservoirs. Thus, the study has made it possible to assess the impact of unintended anthropogenic impact on the chemical composition of surface waters of small reservoirs in the Tomsk region. Special attention has been paid to the role of polyaromatic hydrocarbons in the formation of the ecological state of water bodies and their contribution to changes in the values of the water pollution index. The results obtained demonstrate the importance of such studies for monitoring and protecting aquatic ecosystems.

### Key words:

surface water,  
ionic composition,  
polyaromatic  
hydrocarbons,  
anthropogenic load,  
water pollution index,  
hydrochemical  
indicators,  
small lakes

### For citation

Chuikina, D. I. et al. 2026. Chemical composition of surface water under anthropogenic load (on the example of small reservoirs in the Tomsk region). *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 75–89. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-75-89>.

## Введение

Проблема загрязнения природных вод вследствие техногенной деятельности человека приобретает все большие масштабы. Вода – ключевой ресурс, как ее очистить, быстро найти и устранить загрязнения – эти вопросы становятся все более и более актуальными. Поверхностные воды представляют собой многокомпонентные природные системы, характеризующиеся высокой степенью динамичности и взаимодействием различных факторов, что делает их сложным объектом для оценки, особенно в количественном аспекте. Геохимические, гидрологические, географические, сезонные, климатические и антропогенные компоненты оказывают комплексное влияние на химический состав поверхностных вод, что требует системного подхода к их изучению и мониторингу.

Для всестороннего описания состояния природных поверхностных вод используются ключевые физико-химические параметры, такие как температура, водородный показатель (pH), окислительно-восстановительный потенциал (Eh), содержание макрокомпонентных ионов, железа, а также наличие тяжелых металлов, нефтепродуктов и стойких органических загрязнителей. Эти параметры позволяют оценить степень антропогенного воздействия и выявить потенциальные экологические риски.

По всему миру для оценки качества природных вод активно применяются различные интегральные показатели и индексы, позволяющие объективно охарактеризовать экологическое состояние водных объектов. Так, в Австралии для этих целей используется индекс WSC (Rogers, 2020), который учитывает широкий спектр химических и биологических параметров. В южных регионах Индии оценка качества подземных вод проводится с помощью индекса загрязнения подземных вод (PIG) и индекса качества воды (WQI), что позволяет выполнять пространственный анализ распределения загрязнений (Sunithal et al., 2022). В Российской Федерации и странах Европейского экономического сообщества применяются различные индексы для оценки качества природных вод, основанные на гидрохимических характеристиках воды. Среди них можно выделить удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ), баварский индекс (CJ), индекс загрязненности воды и канадский индекс (CCME WQI), индексы загрязнения рек тяжелыми металлами и токсичными веществами, индекс потенциального загрязнения, общесанитарные индексы качества и индекс токсичности (Зубарев, 2014). Эти индексы позволяют проводить сравнительный анализ состояния водных экосистем и разрабатывать эффективные меры по их защите и восстановлению (Кимстач, 1993). Для расчета индексов существует аналитическая и правовая системы, которые учитывают широкий набор показателей.

В настоящее время вопросам региональной гидрогеологии не уделяется достаточного внимания. Антропогенное воздействие иногда является ландшафтно-деструктивным, неосознанным, когда человек не предполагает последствий своей деятельности и осознает только тогда, когда появляются побочные эффекты. Риски, которым подвергаются малые водоемы, практически не попадают в системы мониторинга до того момента, пока не наступает ситуация катастрофы.

Нерациональные управленческие решения в аграрном секторе, а также бытовые и промышленные сточные воды, способствующие увеличению концентрации стойких органических загрязнителей и биогенных веществ в экосистемах пресноводных водоемов, приводят не только к деградации трофического статуса водных экосистем и ухудшению качества водной среды, но и к снижению биологического и видового разнообразия. В частности, эвтрофирование водоемов обусловлено поступлением биогенных элементов на территории водосборов через атмосферные процессы (Минакова и др., 2022).

Вопросы по прогнозированию экологических последствий, где учитывались бы антагонистические, кумулятивные, синергетические эффекты от одномоментного присутствия загрязнителей решаются, к сожалению, не быстро. Уровень воздействия на природные водные системы высок, и гидрогеологических показателей уже недостаточно, чтобы полноценно описать уровень отрицательного воздействия на среду.

В последние годы наблюдается усиленное загрязнение водных экосистем токсичными веществами: стойкими органическими загрязнителями, тяжелыми металлами, фенолами, нефтепродуктами и др. Научные исследования сосредоточены на изучении количественного содержания полиароматических углеводородов и их структурных соотношений, что является ключевым аспектом в анализе экологической ситуации. В рамках многолетних изысканий для данного класса органических соединений были разработаны и апробированы различные критерии оценки канцерогенности, мутагенности и токсичности. Кроме того, изучение их сорбционных, консервационных и концентрирующих свойств, особенно в контексте донных отложений (ДО), позволило сформировать обширную доказательную базу, которая может быть использована в качестве надежного индикатора для оценки антропогенного воздействия на водные экосистемы с учетом временного фактора. Анализ кернов донных осадков предоставляет возможность не только оценить степень вторичного загрязнения водных объектов, но и идентифицировать вероятные источники поступления ПАУ, а также оценить ряд ключевых параметров качества воды (Yunkera et al., 2002; Семенов и др., 2017;

Чуйкина и др., 2024). Для установления трофического статуса водоема и оценки качества вод Kumari et al. (2023) успешно использовали такие показатели, как содержание ионов тяжелых металлов, pH, содержание растворенного кислорода в среде, биологическое потребление кислорода.

В настоящее время широко применяется методология оценки экологических рисков, включающая комплексный анализ содержания тяжелых металлов, ПАУ и растительных пигментов в донных отложениях. Данный подход позволяет проводить детальный мониторинг и оценку состояния экосистем, что подтверждается многочисленными исследованиями (Tarnawski et al., 2018; Беляева, 2014). Построение системы мониторинга на основе описанных выше показателей делает данные исследования перспективными и актуальными.

В черте больших городов всегда есть участки, которые местные жители используют для активного отдыха. Там часто расположены базы отдыха, садоводческие товарищества, а в последнее время стали популярны глэмпинги и экотуризм. В результате нагрузка на малые водоемы возросла. В тридцати пяти километрах от г. Томска расположены небольшие озера, которые служат местом отдыха горожан (Иоганзен и др., 1951). Эти водоемы регулярно изучают и наблюдают за ними, так как они страдают от неконтролируемого воздействия человека. Пять малых водоемов Томского района (Томская область) были определены для исследования, отобраны пробы поверхностных вод и ДО (рис. 1).

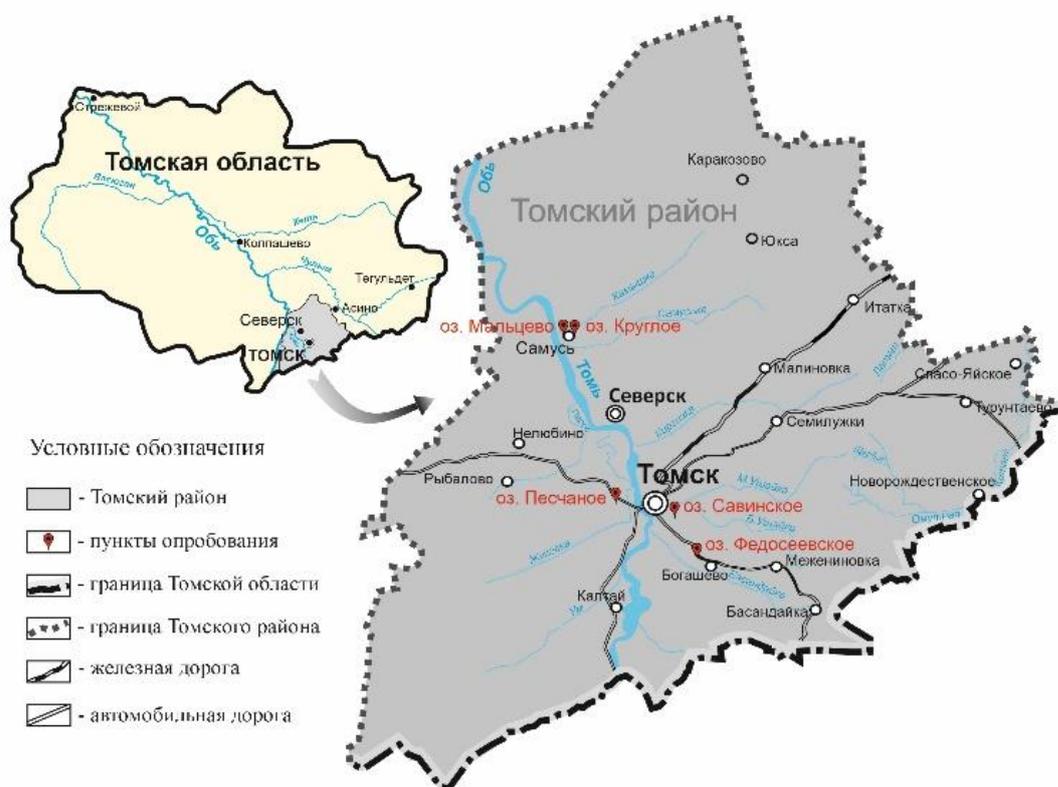


Рис. 1. Томский район (карта фактического материала)  
Fig. 1. Tomsk region (map of the actual material)

Отобранные для изучения пруды и озера Томского района представляют собой водоемы природного и искусственного происхождения. Среди них – озера Мальцево и Круглое в поселке Самусь, сочетающие природные и антропогенные особенности и образующие единую гидрологическую систему. Они соединены между собой протокой и размещены каскадом на поверхности второй надпойменной террасы р. Томь. Дно обоих водоемов – песчаное. Питание за счет ручьев, берущих начало в близлежащих торфяных болотах, поэтому вода имеет насыщенный коричневатый оттенок.

Озеро Мальцево диаметром около 800 м, круглой формы, максимальная глубина достигает 5 м, а площадь водного зеркала – 280 000 м<sup>2</sup>. Озеро Круглое, расположенное рядом, немного меньше, его диаметр составляет около 600 м, наибольшая глубина варьируется в пределах 3,5–4 м, а площадь – около 230 000 м<sup>2</sup>.

Природным объектом является озеро Песчаное, расположенное в юго-западной части села Тимирязевское, находящегося в пределах Тимирязевского бора. Геометрическая форма водоема является строго круглой, а его диаметр составляет около 300 м. Максимальная глубина озера достигает 3,5 м. Вода в озере характеризуется низкой прозрачностью и желтоватым оттенком, что свидетельствует о наличии в ней растворенных органических веществ. Береговая линия озера преимущественно песчаная, однако южные

и юго-западные сектора подвержены заболачиванию. В северо-восточной части наблюдается урбанизация территории, выраженная в застройке дачными участками. В последние годы отмечается тенденция к обмелению водоема и его зарастанию ряской, что вызывает беспокойство у местного населения. Местные активисты и владельцы дачных участков ежегодно проводят мероприятия по очистке озера и поддержанию его водного баланса. Для этого используется вода из близлежащей скважины, что позволяет частично компенсировать дефицит водных ресурсов и предотвратить дальнейшее ухудшение экологического состояния озера.

Савинское озеро представляет собой антропогенно созданный водоем, который был сформирован в 1970-х годах посредством возведения плотины-запруды. Эта плотина не только перекрывает естественную долину, но и выполняет функцию транспортной артерии, соединяющей садоводческие товарищества "Весна" (расположено на северной оконечности озера) и "Красивый пруд" – находится на южной стороне водоема вдоль его восточного берега. Пруд характеризуется неправильной прямоугольной формой, вытянутой с северо-востока на юго-восток. Его ширина составляет приблизительно 230 м, а длина достигает до 1 км. Общая площадь водного зеркала – 175 000 м<sup>2</sup>. Максимальная глубина водоема наблюдается в южной части, непосредственно за плотиной, и варьируется в пределах 5–7 м. Водный режим пруда формируется за счет весеннего стока с окружающих полей, он расположен в 1,5–2 км к востоку от поселка Зональная Станция и в 2 км к западу от деревни Трубачево.

Федосеевское озеро, также являющееся искусственным водоемом, находится в юго-восточной части села Богашево. Оно образовано посредством плотины, аккумулирующей сток с прилегающих лесных и сельскохозяйственных территорий. Площадь водного зеркала этого пруда подвержена значительным сезонным колебаниям: в засушливые периоды лета она минимальна и составляет около 1 320 м<sup>2</sup>, в то время как в мае, в период максимального наполнения, достигает 2 650 м<sup>2</sup>. Максимальная глубина водоема составляет до 2–2,5 м. Восточный берег пруда, характеризующийся обрывистым рельефом, служит границей природного заказника "Богашевский кедровник", что придает этому водоему особую экологическую значимость.

Цель исследования – изучить влияние антропогенного воздействия на химический состав поверхностных вод и выявить взаимосвязь между определяемыми показателями качества вод на примере малых водоемов Томского района.

## Материалы и методы

Отбор проб для изучения проводили в августе 2022 г., каждая из проб проанализирована не менее 3-х раз, в статье приведены усредненные значения. Пробы воды отбирали в стеклянную емкость с глубины 0,4–0,6 м и консервировали н-гексаном (х.ч.). С помощью пробоотборника ПДО-500 отобраны донные отложения с глубины 0–10 см. Отложения озер Савинское, Круглое и Мальцево представлены мелким песчанником, а в озерах Федосеевское и Песчаное – песчано-илистый тип грунта.

Массовые концентрации ионного состава водных растворов были определены в соответствии с методиками ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.74-2012, ПНД Ф 14.1:2:4.167-000, ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18 и ПНД Ф 16.1:2:2.3:2.2.69-10<sup>1</sup>, используя аналитический прибор "Капель-205" производства компании "Люмэкс" (Россия).

Для определения биологического потребления кислорода применялась методика НДП 10.1:2:3.131-2016<sup>2</sup>, регламентирующая процедуру измерения биохимического потребления кислорода (БПК<sub>5</sub>) в течение пяти дней инкубации для проб питьевых, природных и сточных вод с использованием амперометрического метода.

Используя методику (Сигарева и др., 2021), одностадийной экстракцией 90%-м раствором ацетона фотосинтетические пигменты были выделены из донных отложений, рассчитаны их концентрации. Количественное определение проведено на спектрофотометре Cary 50 (Австралия) на характеристических длинах волн 350–800 нм (Меркушина и др., 2013).

Определение содержания ПАУ в водных образцах проводили согласно ПНД Ф 14.1:2:4.70-96<sup>3</sup>, подробное описание методики извлечения и условий опубликовано (Чуйкина и др., 2024). Используя метод высокоэффективной жидкостной хроматографии, в пробах поверхностных вод изученных озер были идентифицированы и количественно определены отдельные приоритетные соединения класса ПАУ: высокомолекулярные полиароматические углеводороды (ВМ ПАУ) – пирен, хризен, флуорантен, бенз[а]антрацен, бенз[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен, бенз[а]пирен, дибенз[а,h]антрацен и низкомолекулярные (НМ ПАУ) – 2-метилнафталин, флуорен, нафталин, антрацен, фенантрен.

## Результаты и обсуждение

Водоемы, выбранные для настоящего исследования, подвергаются значительному антропогенному воздействию в результате их близости к крупным населенным пунктам, таким как г. Томск, поселок Самусь, село Богашево и деревня Тимирязевское, данное воздействие проявляется в виде трансформации природных экосистем, вызванной деятельностью человека.

<sup>1</sup> URL: <https://gostassistant.ru/>.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Там же.

В августе 2022 г. в полевых условиях были проведены исследования гидрохимических параметров озер с использованием портативных датчиков фирмы Hanna. В момент отбора проб температура воды варьировалась в пределах 18–21 °С, что соответствует климатической норме данного региона и сезона. В озерах Мальцево, Круглое, Савинское, Федосеевское и Песчаное значение водородного показателя (рН) фиксировалось от 6,8 до 7,2, что свидетельствует о нейтральной реакции среды, а изменение электропроводности (Еh) фиксировалось в диапазоне от 0,14 до 0,34 мСм/см, поэтому эти водные объекты классифицируются как пресноводные водоемы.

На удовлетворительное качество природных вод указывает макрокомпонентный состав, включающий основные катионы:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и анионы:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{F}^-$ . Их содержание не превышает предельно-допустимые концентрации (СанПиН 1.2.3685-21<sup>4</sup>), а метод капиллярного электрофореза с высокой точностью (нижний порог обнаружения составляет 0,004 мг/л) и погрешностью не более 2 % позволяет определять данные параметры не только в воде, но и в водных вытяжках донных отложений. Результаты представлены в табл. 1.

Для районов с антропогенной нагрузкой уровень нитратов ( $\text{NO}_3^-$ ), как правило, выше нормы 4,5 мг/л. Норма для фосфат-ионов не должна превышать 3,5 мг/л (Агбалян и др., 2019). Фиксация увеличения концентраций по различным соединениям азота и фосфора в природных водах однозначно указывает на присутствие в системе промышленных загрязнений и бытовых стоков, а вот недостаток нитратов связывают с возможной активностью денитрифицирующих природных микроорганизмов. К сожалению, мы не анализировали их содержание в воде и ДО. В исследованных малых водоемах Томского района концентрация биогенных ионов  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  остается в пределах допустимых значений, таким образом, на изучаемые водные системы влияние существующих загрязняющих стоков незначительно.

Таблица 1. Макрокомпонентный ионный состав водоемов Томского района  
Table 1. Macro-component ionic composition of reservoirs in the Tomsk district

Водоемы	Содержание, мг/л								
	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{F}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
Круглое	2,81	2,66	<0,2	<0,2	<0,1	2,41	1,94	3,47	0,98
Мальцево	2,62	1,36	<0,2	<0,2	<0,1	1,83	2,25	2,83	0,96
Песчаное	0,56	0,43	<0,2	<0,2	0,38	6,78	0,13	16,35	5,11
Савинское	3,91	14,98	<0,2	<0,2	0,21	10,23	2,52	36,76	7,00
Федосеевское	2,91	2,51	<0,2	<0,2	0,20	6,13	1,22	52,19	9,48
ПДК	100	300	3,5	45	1,5	200	200	180	50

Для комплексной оценки экологического состояния малых озер Томского района, включая выявление признаков антропогенного воздействия (Сагдеев и др., 2017), был выбран один из наиболее распространенных и апробированных в отечественной практике показателей – индекс загрязнения воды (Гагарина, 2012). Его расчет выполнен по следующим основным гидрохимическим параметрам: содержание растворенного кислорода, БПК<sub>5</sub> и ионного состава воды (табл. 2). Использование индекса загрязнения воды позволяет не только оценить текущее качество воды, но и выявить тенденции изменения экологической обстановки в локальных водоемах, особенно в условиях растущего антропогенного давления.

Таблица 2. Коэффициент ИЗВ, рассчитанный по гидрохимическим показателям озер Томского района  
Table 2. The WPI factor calculated from the hydrochemical parameters of the lakes of the Tomsk district

Показатель	Малые озера Томского района				
	Круглое	Мальцево	Песчаное	Савинское	Федосеевское
БПК <sub>5</sub> (мгО <sub>2</sub> /л)	3,8	3,1	3,1	3,5	3,4
Растворенный кислород (мг/л)	7,3	7,3	7,5	8,1	7,8
$\text{Ca}^{2+}$ (мг/л)	3,47	2,83	16,35	36,76	52,19
$\text{Mg}^{2+}$ (мг/л)	0,98	0,96	5,11	7,00	9,48
$\text{Cl}^-$ (мг/л)	2,66	1,36	0,43	14,98	2,51
$\text{SO}_4^{2-}$ (мг/л)	2,81	2,62	0,56	3,91	2,91
ИЗВ	1,86	1,74	1,80	2,00	1,95

<sup>4</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные нормы и требования "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". URL: [https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat\\_files/174/2801/SP123685\\_21.pdf?ysclid=mm8xuh1vam332677501](https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat_files/174/2801/SP123685_21.pdf?ysclid=mm8xuh1vam332677501).

Проведенные исследования позволили составить шкалу по значениям коэффициента ИЗВ для водных объектов. Так, было рекомендовано природные воды классифицировать на семь групп: I – очень чистые ( $\leq 0,2$ ), II – чистые ( $>0,2-1,0$ ), III – умеренно загрязненные ( $1,0-2,0$ ), IV – загрязненные ( $2,0-4,0$ ), V – грязные ( $4,0-6,0$ ), VI – очень грязные ( $6,0-10,0$ ), VII – чрезвычайно грязные ( $>10$ ) (Гагарина, 2012).

Значения индекса загрязнения воды для исследуемых водоемов не превышают величину, равную 2 (рис. 2), что позволяет отнести их к III классу умеренно загрязненных, ближе к загрязненным водоемам. Следует обратить внимание на тот факт, что при расчете ИЗВ из всех используемых параметров наибольший вклад вносят значения растворенного кислорода и БПК, определенное на 5 суток.



Рис. 2. Показатель ИЗВ и интегральная оценки качества воды для малых озер Томского района:  
1 – оз. Мальцево; 2 – оз. Круглое; 3 – оз. Савинское; 4 – оз. Федосеевское; 5 – оз. Песчаное  
Fig. 2. WPI indicator and integrated assessment of water quality for small lakes of the Tomsk district:  
1 – lake Maltsevo; 2 – lake Krugloye; 3 – lake Savinskoe; 4 – lake Fedoseevskoe; 5 – lake Peschanoye

При исследовании водных экосистем необходимы сведения об основном показателе, позволяющем оценить формирование и трансформацию органического вещества. Содержание основного фотосинтетического пигмента хлорофилла а ("Хл а") служит характеристикой продукционных возможностей водорослей, их биомассы, а также трофического статуса водоема и качества воды (Винберг, 1960; Кумаев, 2007).

Вопрос о взаимосвязи содержания осадочных пигментов с трофическим уровнем водоема остается предметом научных дискуссий и требует дальнейшего углубленного изучения. Одним из ключевых показателей биологической активности в водных экосистемах является хлорофилл а – основной пигмент, присутствующий в клетках фотосинтезирующих организмов, включая одноклеточные водоросли, составляющие фитопланктон. Несмотря на наличие у водорослей нескольких десятков различных пигментов, именно "Хл а" играет центральную роль в процессе фотосинтеза, обеспечивая улавливание световой энергии и ее преобразование.

Концентрация данного пигмента в водной толще широко применяется в качестве интегрального показателя для оценки биомассы фитопланктона, его продуктивности и общего трофического статуса водоема. Согласно данным Сигаревой и др. (2021), увеличение продуктивности планктонных организмов обуславливает обогащение донных отложений органическим веществом, включающим фитопигменты, вследствие чего распределение пигментов в донных отложениях находится в прямой зависимости от их концентрации в водной среде.

Помимо этого, динамика содержания хлорофилла а выступает значимым индикатором антропогенного загрязнения и процессов эвтрофикации водоема. На скорость аккумуляции пигментов в донных отложениях оказывают влияние гидродинамические характеристики водоема и тип грунта. Такие факторы, как интенсивность освещения, температурный режим и морфология дна, обуславливают вариабельность состава водной массы и донных отложений, что может приводить к расхождениям в оценке трофического статуса одного и того же водоема.

Анализ соотношений между хлорофиллом а и его производными – продуктами разрушения (феопигментами), а также с другими фотосинтетическими пигментами, такими как хлорофилл в, хлорофилл  $c_1+c_2$  и различными каротиноидами, дает представление о физиологическом состоянии водорослевых

популяций, их активности, стрессах и скорости метаболических процессов. Типичные спектры поглощения пигментов в ацетоновом экстракте приведены на рис. 3.

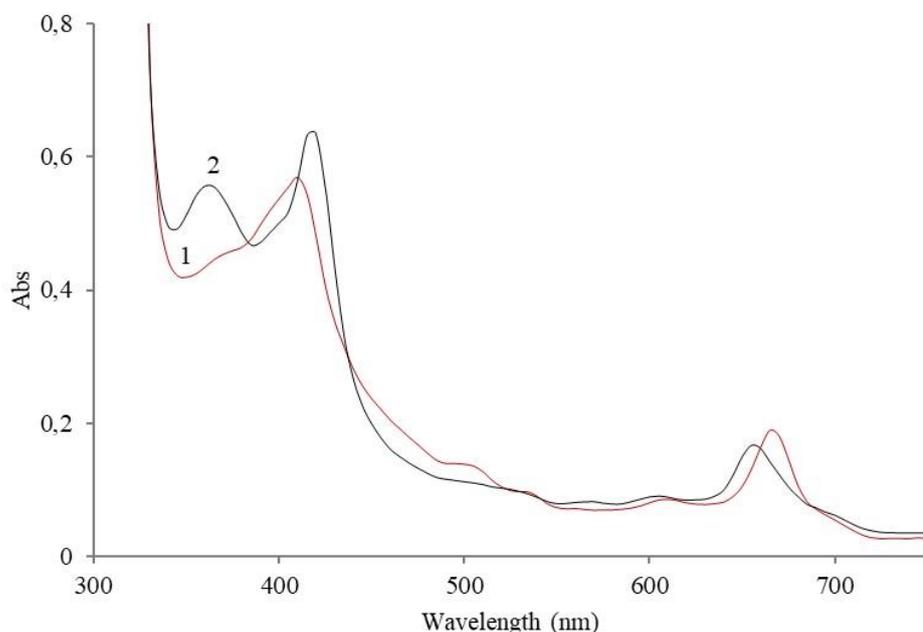


Рис. 3. Типичный спектр поглощения ацетоновой вытяжки из образцов донных отложений озер Томского района: 1 – исходный спектр; 2 – спектр, подкисленный 10%-й соляной кислотой  
 Fig. 3. Typical absorption spectrum of acetone extract from bottom sediment samples of lakes in the Tomsk district: 1 – initial spectrum; 2 – spectrum acidified with 10 % hydrochloric acid

Поскольку донные отложения являются "природным архивом", то для оценки трофического состояния озер пигменты были выделены именно из них. Результаты спектрофотометрического анализа ацетоновых экстрактов на длинах волн 430, 480, 630, 645, 664, 750 нм в двух формах: исходной и подкисленной 10%-й соляной кислотой, позволили определить абсолютное содержание пигментов, а также определить относительное содержание "Хл а" от суммы всех присутствующих форм хлорофиллов в образцах ДО малых водоемов.

Как правило, трофический статус озер определяется по составу воды и ДО. В исследованиях (Минеева, 2004; Неверова-Дзюнак и др., 2020; Сигарева и др., 2021) установлено, что содержание "Хл а" в пресных водоемах в воде варьируется в диапазоне от 2 до 100 мкг/л и "Хл а + Фео" в ДО в диапазоне от 12 до 120 мкг/г сухого остатка (с.о.) в зависимости от уровня продуктивности экосистемы. Содержание пигментов в воде и ДО составляет: в олиготрофных озерах <3мкг/л и <12 мкг/г с.о., в мезотрофных – 3–60 мкг/л и 12–95 мкг/г с.о., в эфотрофных – >60 мкг/л и >95 мкг/г с.о. соответственно.

Таблица 3. Содержание фитопигментов в донных отложениях малых водоемов Томского района (в числителе – абсолютное содержание, мкг/г; в знаменателе – среднее значение, мкг/г)  
 Table 3. Phytopigment content in bottom sediments of small reservoirs of the Tomsk district (in the numerator – the absolute content, µg/g; in the denominator – the average value, µg/g)

Озеро	Содержание, мкг/г				∑ всех пигментов	ПО	% Хл а от ∑ всех Хл
	Хл а	Хл в	Хл с	С карот			
Круглое	<u>0,28–0,45</u> 0,37	<u>0,09–0,15</u> 0,12	<u>0,10–0,18</u> 0,14	<u>0,45–0,71</u> 0,58	<u>0,91–1,51</u> 1,21	<u>1,56–1,61</u> 1,59	<u>57,29–59,15</u> 58,22
Мальцево	<u>0,24–0,84</u> 0,56	<u>0,10–0,15</u> 0,12	<u>0,12–0,15</u> 0,14	<u>0,49–0,92</u> 0,7	<u>0,99–2,06</u> 1,52	<u>1,05–1,98</u> 1,52	<u>49,44–76,2</u> 62,82
Песчаное	<u>6,60–23,00</u> 14,9	<u>0,94–1,49</u> 1,22	<u>0,94–1,53</u> 1,23	<u>11,79–31,3</u> 21,54	<u>20,29–57,53</u> 38,91	<u>1,78–1,35</u> 1,56	<u>77,88–88,49</u> 83,19
Савинское	<u>0,35–2,00</u> 1,14	<u>0,45–1,35</u> 0,82	<u>0,78–1,29</u> 1,04	<u>1,31–4,14</u> 2,92	<u>2,9–8,78</u> 5,93	<u>2,07–3,69</u> 2,94	<u>21,03–43,11</u> 34,7
Федосеевское	<u>2,2–3,30</u> 2,8	<u>1,16–1,5</u> 1,33	<u>1,15–1,97</u> 1,56	<u>4,51–7,34</u> 5,93	<u>10,22–13,01</u> 1,61	<u>2,01–2,19</u> 2,1	<u>39,28–59,18</u> 49,23

Примечание. Хлорофилл а – Хл а; хлорофилл в – Хл в; хлорофилл с – Хл с; каротиноиды – С карот; пигментное соотношение – ПО.

Для всех изученных образцов донных отложений наблюдается широкий разброс содержания "Хл а", например от 0,35 до 2,3 мкг/г в оз. Савинское (табл. 3). Это может быть связано с неоднородностью пространственного распространения фитопланктона (*Минеева, 2004*). При этом повышенное содержание "Хл а" в оз. Круглое, Мальцево и Песчаное может указывать на преобладание сине-зеленых водорослей, которые ухудшают состояние водоемов, однако в нашей работе отдельно фитопланктон не изучался.

Тип донных отложений является одним из основных факторов, влияющих на накопление и содержание пигментов. Так, ДО озера Круглое и Мальцево представлены мелким песчаником, в них содержание пигментов ниже, чем в песчано-илистых отложениях оз. Федосеевское и Песчаное.

Для характеристики функциональной активности водорослевых сообществ (фитоценозов) применяется показатель, известный как пигментное отношение (ПО). Этот параметр рассчитывается как соотношение суммарной концентрации общих каротиноидов к содержанию хлорофилла а (*Смольская, 2018*). ПО отражает адаптационные процессы в клетках фитопланктона и позволяет судить о физиологическом состоянии популяций под влиянием внешних факторов.

В условиях оптимального функционирования водорослевых сообществ значение пигментного отношения, как правило, находится в диапазоне от 2 до 5. При этом важно учитывать сезонную динамику – величина ПО может варьироваться в течение года в зависимости от температуры, интенсивности солнечного света и доступности питательных веществ. В мезотрофных водоемах, характеризующихся умеренной биологической продуктивностью, типично преобладание каротиноидов над зелеными пигментами, что обусловлено защитной ролью каротиноидов при умеренном уровне светового стресса.

Для всех исследованных озер Томского района значение ПО не превысило 3, что укладывается в нормативный диапазон и свидетельствует об удовлетворительной работе фитопланктонных сообществ. Полученные данные подтверждают, что водорослевые популяции находятся в состоянии физиологического равновесия, а экосистемы озер функционируют без признаков стресса или чрезмерной эвтрофикации.

Так как разложение хлорофиллов происходит быстрее, то практически во всех образцах наблюдается преобладание каротиноидов над хлорофиллом а. Повышение пигментного отношения указывает на ухудшение физиологического состояния фитопланктона оз. Савинское по сравнению с остальными озерами. Это согласуется с показателем ИЗВ, по которому озера относятся к умеренно загрязненным, и для оз. Савинского характерно самое высокое содержание коэффициента ИЗВ (табл. 3).

Повышенное суммарное содержание пигментов в ДО озера Песчаное может быть связано с типом грунта.

На содержание пигментов в донных отложениях влияют различные факторы, например, климатические условия (*Schreider et al., 2023*), содержание тяжелых металлов (*Томилина и др., 2014*), нефтепродуктов (*Азбалин и др., 2019*) и др. Взаимосвязь между содержанием пигментов в ДО и ионным составом вод, нефтезагрязнениями, в том числе ПАУ, изучена недостаточно, поэтому нами предпринята попытка проанализировать взаимосвязь экологического состояния водных объектов и содержания полиароматических углеводородов.

Наибольшей токсичностью обладают легкие фракции нефти, среди ароматических соединений опасность повышается в ряду бензол-толуол-ксилол-триметилбензол, некоторые из алифатических и ароматических углеводородов могут поглощаться и вовлекаться в процесс обмена веществ с их последующей трансформацией, что отрицательно сказывается на растениях (*Шулаев и др., 2016*). В научной литературе отмечается, что полиароматические соединения с 5–6 циклами в структуре, как правило, имеют техногенное происхождение: связаны с процессами неполного сгорания органического топлива, промышленными выбросами и антропогенной активностью (*Опекунов и др., 2015; Халиков и др., 2020*). Как показано в работах *Ровинского и др. (1988)*, именно эти ПАУ с пяти- и шестичленными кольцами обладают высокой канцерогенностью и мутагенной активностью и представляют серьезную экологическую опасность. К таким соединениям относятся бенз[к]флуорантен, бенз[а]пирен, бенз[б]флуорантен и дибенз[а, h]антрацен – вещества, способные накапливаться в биоте и оказывать долгосрочное негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека, что вызывает беспокойство не только в научном, но и медицинском сообществе. В отличие от них, более легкие представители класса ПАУ, такие как нафталин и фенантрен, часто ассоциируются с природными источниками – в первую очередь с разложением гумусовых веществ и остатками наземной высшей растительности.

Отдельной проблемой на сегодняшний день в Российской Федерации заявлено отсутствие нормативов по большинству других приоритетных полиароматических углеводородов, что затрудняет комплексную оценку их влияния на водные ресурсы. Согласно СанПиН 1.2.3685-21<sup>5</sup> только содержание нафталина в воде водных объектов не должно превышать 10 мкг/л, а концентрация бенз[а]пирена должна быть не выше 0,01 мкг/л. В табл. 4 представлены результаты количественного содержания ПАУ в малых водоемах изучаемого района.

---

<sup>5</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные нормы и требования "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". URL: [https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat\\_files/174/2801/SP123685\\_21.pdf?ysclid=mm8xuh1vam332677501](https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat_files/174/2801/SP123685_21.pdf?ysclid=mm8xuh1vam332677501).

Таблица 4. Содержание ПАУ в поверхностных водах малых озер Томского района, в числителе – среднее значение  $\pm$  ошибка среднего, мкг/л; в знаменателе – относительное, %  
 Table 4. PAHs content in the surface waters of small lakes of the Tomsk district, in the numerator – the average value  $\pm$  the error of the average,  $\mu\text{g/l}$ ; in the denominator – relative, %

ПАУ	Содержание, мкг/л				
	Круглое	Мальцево	Песчаное	Савинское	Федосеевское
Нафталин	$0,04 \pm 0,002$ 9,20	$0,04 \pm 0,002$ 10,26	$0,03 \pm 0,002$ 8,42	$0,02 \pm 0,001$ 4,51	$0,02 \pm 0,001$ 4,18
2-метилнафталин	$0,03 \pm 0,002$ 5,75	$0,05 \pm 0,003$ 12,82	$0,03 \pm 0,002$ 7,54	$0,04 \pm 0,002$ 7,67	$0,02 \pm 0,001$ 4,07
Флуорен	$0,08 \pm 0,002$ 17,24	$0,04 \pm 0,002$ 10,26	$0,03 \pm 0,002$ 7,46	$0,12 \pm 0,012$ 21,51	$0,12 \pm 0,011$ 28,32
Фенантрен	$0,08 \pm 0,002$ 17,24	$0,09 \pm 0,003$ 21,79	$0,10 \pm 0,004$ 26,84	$0,06 \pm 0,003$ 11,84	$0,03 \pm 0,002$ 7,72
Антрацен	0,00 0,00	0,00 0,00	следы(traces) 0,27	следы(traces) 0,17	$0,01 \pm 0,004$ 1,78
Флуорантен	$0,06 \pm 0,003$ 12,64	$0,05 \pm 0,002$ 11,54	$0,07 \pm 0,002$ 17,98	$0,06 \pm 0,003$ 10,77	0,09 21,64
Пирен	$0,02 \pm 0,001$ 4,60	$0,02 \pm 0,001$ 3,85	$0,03 \pm 0,002$ 7,31	$0,01 \pm 0,004$ 1,95	$0,02 \pm 0,001$ 5,02
Бензо[а]антрацен	$0,05 \pm 0,003$ 11,49	$0,03 \pm 0,002$ 6,41	$0,04 \pm 0,002$ 10,46	$0,03 \pm 0,002$ 6,10	$0,02 \pm 0,001$ 5,71
Хризен	$0,03 \pm 0,002$ 6,90	$0,02 \pm 0,001$ 5,13	$0,03 \pm 0,002$ 6,97	$0,02 \pm 0,001$ 3,26	$0,02 \pm 0,001$ 4,69
Бенз[б]флуорантен	$0,01 \pm 0,004$ 2,30	$0,03 \pm 0,002$ 6,41	следы(traces) 0,33	$0,04 \pm 0,002$ 7,91	$0,01 \pm 0,004$ 1,78
Бенз[к]флуорантен	$0,01 \pm 0,004$ 1,15	$0,02 \pm 0,001$ 3,85	следы(traces) 0,16	$0,04 \pm 0,002$ 6,71	$0,01 \pm 0,004$ 1,85
Бенз[а]пирен	$0,01 \pm 0,004$ 2,30	$0,01 \pm 0,004$ 2,56	$0,01 \pm 0,004$ 1,84	$0,02 \pm 0,001$ 3,57	$0,01 \pm 0,004$ 2,70
Дибенз[аh]антрацен	$0,04 \pm 0,002$ 9,20	$0,02 \pm 0,001$ 5,13	$0,02 \pm 0,001$ 4,41	$0,08 \pm 0,002$ 14,02	$0,04 \pm 0,002$ 10,54
$\Sigma$ НМ	0,22	0,22	0,19	0,25	0,19
$\Sigma$ ВМ	0,22	0,18	0,18	0,29	0,23
$\Sigma$ ПАУ	0,44	0,40	0,37	0,54	0,42
ВМ/ НМ	1	0,82	0,95	1,16	1,21

Интерес к экологическому состоянию водных объектов продолжает расти во всем мире, особенно в свете выявления распространения стойких органических загрязнителей, таких как ПАУ. Исследования, проведенные в Китае (Kuo Yao et al., 2023; Song et al., 2023), показали, что в городских водоемах, в частности в озерах Донг и Тансюнь, суммарная концентрация ПАУ варьируется в пределах 0,013–0,989 мкг/л. Мониторинг питьевых вод ряда китайских городов показал, что уровень ПАУ может изменяться от 0,004 до 0,231 мкг/л (Zhang et al., 2019), что свидетельствует о широком распространении этих соединений даже в системах водоснабжения. Антропогенное влияние на водные экосистемы охватывает не только урбанизированные территории, но и удаленные природные регионы. Так, на архипелаге Шпицберген, в озере Стамме, средние концентрации ПАУ находятся в интервале от 0,002–0,29 мкг/л. А для летне-осеннего периода они возрастают до 0,713 мкг/л, что, вероятно, связано с увеличением атмосферного переноса и таянием снегов (Третьяков и др., 2021). Одно из самых уникальных и чистых озер мира – Байкал, в поверхностных водах содержание ПАУ колеблется от 0,03 до 0,13 мкг/л (Горшков и др., 2010), что указывает на поступление этих соединений даже в малонаселенные и охраняемые территории.

В ходе анализа проб из малых озер Томского района установлено, что такие индивидуальные приоритетные ПАУ, как фенантрен, флуорен и флуорантен, наиболее представлены в выделенных экстрактах из водных проб. Максимальные значения флуорена (до 0,12 мкг/л) зафиксированы в озерах Федосеевское и Савинское, где также отмечено повышенное содержание флуорантена и дибенз[а,h]антрацена. В целом, в исследуемых водах преобладают низкомолекулярные ПАУ (двух- и трехкольцевые), входящие в список приоритетных для мониторинга. Их высокая растворимость в водной среде способствует более легкому переносу и накоплению. Для всех изученных озер подтверждена типичная закономерность: флуорантен превышает по концентрации пирен, что объясняется его большей гидрофильностью и устойчивостью в водной фазе (Ровинский и др., 1988; AMAR, 2007).

Минимальные суммарные значения концентраций ПАУ определены в озере Песчаное (0,37 мкг/л), и в нем же отмечено максимальное содержание фенантрена (0,1 мкг/л), источником которого, вероятно, являются пирогенные процессы, связанные с бытовой и хозяйственной деятельностью населения. Согласно данным *Ровинского и др. (1988)*, высокое содержание фенантрена в природных водах может быть связано со способностью почвы генерировать фенантрен и хризен в результате трансформации погребенной органической биомассы.

Содержание ПАУ меняется в зависимости от времени года. Наши исследования показали, что в образцах, взятых в конце лета, уровень ПАУ соответствует типичным летним значениям, независимо от антропогенного воздействия (*Третьяков и др., 2021*) и колеблется в области концентраций от 0,37 до 0,54 мкг/л для поверхностных вод малых водоемов Томского района.

Показатель соотношения суммы высокомолекулярных (ВМ) к сумме низкомолекулярных (НМ) ПАУ для изучаемых водоемов Томского района находится в интервале от 0,82 до 1,21. Отношение  $\Sigma\text{ВМ}/\Sigma\text{НМ} > 1$  свидетельствует о преобладании четырех- и более кольцевых соединений, которые относятся к трудноокисляемой растворенной органической материи. Эти соединения практически не участвуют в процессах биохимического потребления кислорода (БПК<sub>5</sub>), поэтому не учитываются при расчете индекса загрязнения воды (*Гагарина, 2012*) и не влияют на классификацию водоема по степени загрязненности.

Таким образом, существует значительный разрыв между реальной токсикологической опасностью и методами оценки качества воды: потенциально опасные, канцерогенные ПАУ, способные к биоаккумуляции и длительному сохранению в экосистемах, не нормируются и не включаются в действующие индексы. Устойчивость ПАУ, их медленная трансформация и способность к накоплению делают их ценными маркерами антропогенного воздействия. Включение количественных данных по полиароматическим углеводородам в систему мониторинга позволило бы не только расширить критерии оценки антропогенной нагрузки, но и повысить достоверность контроля состояния водных экосистем.

## Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать обоснованный вывод о текущем экологическом состоянии малых озер Томского района. На основании расчетов индекса загрязнения воды установлено, что изученные водоемы попадают в диапазон умеренно загрязненных и загрязненных водных объектов. Такое ранжирование свидетельствует о наличии выраженного антропогенного влияния, несмотря на относительно низкую степень урбанизации территории.

Показано, что содержание пигментов очень неравномерно распределено по площади озер, что может быть связано с неоднородностью пространственного распространения фитопланктона. Наибольшее значение ПО определено в оз. Савиновское, что подтверждает его более сильное загрязнение по сравнению с остальными озерами. Оценка трофического статуса озер на основании содержания природных пигментов коррелирует с показателем ИЗВ.

Нормативные значения предельно допустимых концентраций ПАУ в России, странах Европы и США существенно различаются, что обусловлено отличиями в подходах к оценке экологического риска, методологиях мониторинга и степени изученности токсикологических свойств этих соединений. Для поверхностных вод малых озер Томского района установлено, что содержание этих приоритетных ПАУ соответствуют установленным нормативам (концентрации находятся ниже или на уровне ПДК). Исключение – водоем Савинский, там зафиксировано превышение по бенз[а]пирену 0,02 мкг/л, т. е. в два раза выше допустимого значения. Это может свидетельствовать о локальном источнике загрязнения, вероятно, связанном с пирогенными процессами (сжигание топлива, органического сырья, мусора в жилом секторе) и переносом воздушными массами продуктов горения на расстояние. При этом важно отметить, что большинство других ПАУ, включая такие токсичные соединения, как бенз[а]антрацен, хризен и дибенз[а,h]антрацен, в РФ на данный момент в воде не нормируются, что ограничивает возможности полной оценки экологического и санитарно-гигиенического состояния вод.

Обобщая проведенные исследования, была предпринята попытка установить взаимосвязь между всеми предложенными показателями: ИЗВ, суммарным содержанием пигментов, суммой ПАУ и трофическим статусом озер. Все показатели находятся в тесной зависимости друг от друга, но делать однозначный вывод пока рано, так как необходимо увеличение количества исследуемых образцов малых озер для получения полной картины с использованием статистических методов.

Следует обратить внимание, что влияние антропогенного воздействия на химический состав поверхностных вод на примере малых водоемов Томского района происходит постоянно, так как данные территории активно используются населением. Полученные результаты подчеркивают необходимость расширения системы мониторинга за счет включения дополнительных показателей, в том числе токсичных органических соединений, для более объективной оценки экологического здоровья малых водоемов.

### Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта фундаментальных научных исследований РАН № FWZZ-2026-004.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Агбалян Е. В., Шинкарук Е. В. Химический состав вод малых озер нефтегазодобывающих районов севера Западной Сибири // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 7. С. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37158>.
- Беляева П. Г. Трофический статус Камского водохранилища по фитопланктону в летний период // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16, № 5. С. 244–248.
- Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Минск : Изд-во АН БССР. 1960. 329 с.
- Гагарина О. В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы // *Ижевск : Изд-во "Удмуртский университет"*. 2012. 199 с.
- Горшков А. Г., Маринайте И. И., Земская Т. И., Ходжер Т. В. Современный уровень нефтепродуктов в воде оз. Байкал и его притоков // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2010. № 18. С. 711–718.
- Зубарев В. А. Гидрохимические индексы оценки качества поверхностных вод // *Региональные проблемы*. 2014. Т. 17, № 2. С. 71–77. EDN: RRRLTP.
- Иоганзен Б. Г., Попов М. А., Якубова А. И. Водоемы окрестностей города Томска. Из цикла работ по изучению биологической продуктивности водоемов Сибири // *Труды Том. ун-та*. 1951. Т. 115. С. 121–190.
- Кимстач В. А. Классификации качества поверхностных вод в странах Европейского экономического сотрудничества. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 48 с.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск : Карельский науч. центр РАН, 2007. 395 с.
- Меркушина Г. А., Ларина Н. С. Особенности фотосинтетических пигментов в торфах различного генезиса // *Вестник КазНУ. Серия химическая*. 2013. № 4(72). С. 103–110.
- Минакова Е. А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А., Латыпова В. З. Миграционные потоки биогенных элементов в геосистеме "водосбор – водный объект" в современных условиях // *Геозкология*. 2022. № 2. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.24412/1816-1863-2022-2-13-21>.
- Минева Н. М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М. : Наука, 2004. 156 с.
- Неверова-Дзиопак Е., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод : монография. Санкт-Петербург, 2020. 176 с. EDN: KOLTDW.
- Опекунов А. Ю., Митрофанова Е. С., Сани С. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях рек и каналов Санкт-Петербурга // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2015. Сер. 7. Вып. 4. С. 98–109.
- Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклоароматических углеводородов // *Л. : Гидрометеиздат*, 1988. 233 с.
- Сагдеев М. А., Чигринаева Н. А., Сальникова В. И. Определение содержания катионов и анионов в питьевой воде методом капиллярного электрофореза // *Современные научные исследования и инновации*. 2017. № 3(71). С. 36–39.
- Семенов М. Ю., Маринайте И. И., Жученко Н. А. Выявление источников и путей поступления полициклических ароматических углеводородов в поверхностные воды на основе данных химического мониторинга // *Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. 2017. № 1. С. 40–49.
- Сигарева Л. Е., Тимофеева Н. А., Ложкина Р. А. Современное трофическое состояние бентали Ивановского и Угличского водохранилищ по содержанию осадочных пигментов // *Биология внутренних вод*. 2021. № 2. С. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0320965221020145>.
- Смольская О. С., Жукова А. А., Люля А. С. Пигментные и физико-химические характеристики донных отложений озер Нарочь и Мясстро // *Белорусский государственный университет. Биология*. 2018. № 2. С. 65–77.
- Томилина И. И., Гремячих В. А., Гребенюк Л. П. Эколого-токсикологический мониторинг озер северо-запада и центра европейской части России, расположенных на особо охраняемых территориях // *Водные ресурсы*. 2014. Т. 41, № 3. С. 304–311. DOI: <https://doi.org/10.7868/S032105961403016X>.
- Третьяков М. В., Брызгалов В. А., Румянцев Е. В., Ромашова К. В. Пресноводные ресурсы западного Шпицбергена в современных условиях (многолетние исследования АНИИ) : монография. Санкт-Петербург. 2021. 201 с.
- Халиков И. С., Лукьянова Н. Н. Содержание полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях озера Байкал по результатам мониторинга в 2017–2018 гг. // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. № 6–2(96). С. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.96.6.050>.

- Чуйкина Д. И., Король И. С., Мухортина Н. А., Колубаева Ю. В. Полиароматические углеводороды малых водоемов Томского района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 10. С. 216–225. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4497>.
- Шулаев Н. С., Пряничникова В. В., Быковский Н. А., Кадыров Р. Р. Изучение воздействия нефтяного загрязнения почв на развитие высших растений на примере рогоза широколистного // Успехи современного естествознания. 2016. № 2. С. 193–197. EDN: VOHWAF.
- AMAR (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Ch. 4. Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the Arctic // Oslo. 2007. AMAR. 87 p.
- Kumari N., Thakur K., Kumar R., Kumar S. [et al.]. Freshwater lakes in the Western Himalayan Region: An analysis of the present situation // Water-Energy Nexus. 2023. Vol. 6. P. 18–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.06.002>.
- Kuo Yao, Zhanling Xie, Lihao Zhi, Zefan Wang [et al.]. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the water bodies of Dong Lake and Tangxun Lake, China: Spatial distribution, potential sources and risk assessment by // Water. 2023. Vol. 15(13). N 2416. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15132416>.
- Rogers B. C., Dunn G., Hammer K., Novalia W. [et al.]. Water sensitive cities index: A diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions // Water Research. 2020. Vol. 186. Article number: 116411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116411>.
- Schreider S., Sommaruga R., Psenner R. Changes in air temperature, but not in precipitation, determine long-term trends in water chemistry of high mountain lakes of the Alps with and without rock glacier influence // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 905. Article number: 167750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167750>.
- Song Q., Xue Z., Wu H., Zhai Y. [et al.]. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study // Environmental Research. 2023. Vol. 216. Pt. 4. Article number: 114816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114816>.
- Sunithal V., Muralidhara B. Reddy geochemical characterization, deciphering groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG), water quality index (WQI) and geographical information system (GIS) in hard rock aquifer, South India // Applied Water Science. 2022. Vol. 12. Iss. 41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01527-w>.
- Tarnawski M., Baran A. Use of chemical indicators and bioassays in bottom sediment ecological risk assessment // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2018. Vol. 74. P. 395–407. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0513-2>.
- Yunkera M. B., Macdonaldb R. W., Vingarzanc R., Mitchelld R. H. [et al.]. PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition // Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. P. 489–515. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5).
- Zhang Y., Zhang L., Huang Z. Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: Composition, distribution and influencing factors // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2019. Vol. 177. P. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.119>.

## References

- Agbalyan, E. V., Shinkaruk, E. V. 2019. Chemical composition of waters of small lakes in oil and gas producing regions of the north of Western Siberia. *Successes of Modern Natural Science*, 7, pp. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37158>. (In Russ.)
- Belyaeva, P. G. 2014. Trophic status of the Kama reservoir by phytoplankton in the summer period. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 16(5), pp. 244–248. (In Russ.)
- Vinberg, G. G. 1960. Primary production of reservoirs. (In Russ.)
- Gagarina, O. V. 2012. Assessment and normalization of the quality of natural waters: Criteria, methods, existing problems. Izhevsk. (In Russ.)
- Gorshkov, A. G., Marinaite, I. I., Zemskaya, T. I., Hodger, T. V. 2010. The current level of petroleum products in the lake water. Baikal and its tributaries. *Chemistry in the Interests of Sustainable Development*, 18, pp. 711–718. (In Russ.)
- Zubarev, V. A. 2014. Hydrochemical indices of surface water quality assessment. *Regional Problems*, 17(2), pp. 71–77. EDN: RRRLTP. (In Russ.)
- Johanzen, B. G., Popov, M. A., Yakubova, A. I. 1951. Reservoirs in the vicinity of the city of Tomsk. From the cycle of work on the study of biological productivity of Siberian reservoirs. *Proceedings Tomsk Un-t*, 115, pp. 121–190. (In Russ.)
- Kimstach, V. A. 1993. Classification of surface water quality in the countries of the European Economic Community. St. Petersburg. (In Russ.)
- Kitaev, S. P. 2007. Fundamentals of limnology for marine biologists and ichthyologists. Petrozavodsk. (In Russ.)

- Merkushina, G. A., Larina, N. S. 2013. Features of photosynthetic pigments in peat of various genesis. *KazNU Bulletin. Chemical series*, 4(72), pp. 103–110. (In Russ.)
- Minakova, E. A., Shlychkov, A. P., Kondratiev, S. A., Latypova, V. Z. 2022. Migration flows of biogenic elements in the geosystem "watershed – water body" in modern conditions. *Geoecology*, 2, pp. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.24412/1816-1863-2022-2-13-21>. (In Russ.)
- Mineeva, N. M. 2004. Plant pigments in the water of the Volga reservoirs. Moscow. (In Russ.)
- Neverova-Dziopak, E., Tsvetkova, L. I. 2020. Assessment of the trophic state of surface waters. Monograph. St. Petersburg. EDN: KOLTDW. (In Russ.)
- Opekunov, A. Yu., Mitrofanova, E. S., Sanni, S. 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons in bottom sediments of rivers and canals of St. Petersburg. *Vestnik SPb. univer. Series 7, 4*, pp. 98–109. (In Russ.)
- Rovinsky, F. Ya., Teplitskaya, T. A., Alekseeva, T. A. 1988. Background monitoring of polycycloaromatic coal deposits. Leningrad. (In Russ.)
- Sagdeev, M. A., Chigrineva, N. A., Salnikova, V. I. 2017. Determination of the content of cations and anions in drinking water by capillary electrophoresis. *Modern Scientific Research and Innovation*, 3(71), pp. 36–39. (In Russ.)
- Semenov, M. Yu., Marinaite, I. I., Zhuchenko, N. A. 2017. Identification of sources and routes of polycyclic aromatic hydrocarbons entering surface waters based on chemical monitoring data. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 1, pp. 40–49. (In Russ.)
- Sigareva, L. E., Timofeeva, N. A., Lozhkina, R. A. 2021. The current trophic state of bentali of the Ivankovsky and Uglichsky reservoirs in terms of sedimentary pigments. *Biology of Inland Waters*, 2, pp. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0320965221020145>. (In Russ.)
- Smol'skaya, O. S., Zhukova, A. A., Lyulya, A. S. 2018. Pigment and physicochemical characteristics of bottom sediments of lakes Naroch and Myastro. *Belarusian State University. Biology*, 2, pp. 65–77. (In Russ.)
- Tomilina, I. I., Gremyachikh, V. A., Grebenyuk, L. P. 2014. Ecological and toxicological monitoring of lakes in the north-west and the center of the European part of Russia located in specially protected areas. *Water Resources*, 41(3), pp. 304–311. DOI: <https://doi.org/10.7868/S032105961403016X>. (In Russ.)
- Tretyakov, M. V., Bryzgalov, V. A., Romyantseva, E. V., Romashova, K. V. 2021. Freshwater resources of western Spitsbergen in modern conditions (long-term research of AARI). Monograph. St. Petersburg. (In Russ.)
- Khalikov, I. S., Lukyanova, N. N. 2020. The content of polycyclic aromatic hydrocarbons in the bottom sediments of Lake Baikal according to the monitoring results in 2017–2018. *International Scientific Research Journal*, 6–2(96), pp. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.96.6.050>. (In Russ.)
- Chuikina, D. I., Korol, I. S., Mukhortina, N. A., Kolubaeva, Yu. V. 2024. Polyaromatic hydrocarbons of small reservoirs of the Tomsk region. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*, 335(10), pp. 216–225. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4497>. (In Russ.)
- Shulaev, N. S., Pryanichnikova, V. V., Bykovsky, N. A., Kadyrov, R. R. 2016. Studying the effects of oil pollution of soils on the development of higher plants using the example of broadleaf cattails. *Successes of Modern Natural Science*, 2, pp. 193–197. EDN: VOHWAF. (In Russ.)
- AMAR (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Ch. 4. Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the Arctic. 2007. Oslo. AMAR.
- Kumari, N., Thakur, K., Kumar, R., Kumar, S. et al. 2023. Freshwater lakes in the Western Himalayan Region: An analysis of the present situation. *Water-Energy Nexus*, 6, pp. 18–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.06.002>.
- Kuo, Yao, Zhanling, Xie, Lihao, Zhi, Zefan, Wang et al. 2023. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the water bodies of Dong Lake and Tangxun Lake, China: Spatial distribution, potential sources and risk assessment by. *Water*, 15(13). N 2416. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15132416>.
- Rogers, B. C., Dunn, G., Hammer, K., Novalia, W. et al. 2020. Water sensitive cities index: A diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions. *Water Research*, 186. Article number: 116411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116411>.
- Schreider, S., Sommaruga, R., Psenner, R. 2023. Changes in air temperature, but not in precipitation, determine long-term trends in water chemistry of high mountain lakes of the Alps with and without rock glacier influence. *Science of The Total Environment*, 905. Article number: 167750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167750>.
- Song, Q., Xue, Z., Wu, H., Zhai, Y. et al. 2023. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of oil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study. *Environmental Research*, 216. Pt. 4. Article number: 114816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114816>.
- Sunithal, V., Muralidhara, B. 2022. Reddy geochemical characterization, deciphering groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG), water quality index (WQI) and geographical information system (GIS) in hard rock aquifer, South India. *Applied Water Science*, 12(41). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01527-w>.

- Tarnawski, M., Baran, A. 2018. Use of chemical indicators and bioassays in bottom sediment ecological risk assessment. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 74, pp. 395–407. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0513-2>.
- Yunkera, M. B., Macdonald, R. W., Vingaranc, R., Mitchell, R. H. et al. 2002. PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry*, 33, pp. 489–515. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5).
- Zhang, Y., Zhang, L., Huang, Z. 2019. Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: Composition, distribution and influencing factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 177, pp. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.119>.

#### Сведения об авторах

**Чуйкина Дарья Ивановна** – пр. Академический, 4, г. Томск, Россия, 634055;  
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: [dichuikina@mail.ru](mailto:dichuikina@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5906-2148>

**Daria I. Chuikina** – 4 Akademichesky Ave., Tomsk, Russia, 634055;  
Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, Tomsk Department,  
Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher;  
e-mail: [dichuikina@mail.ru](mailto:dichuikina@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5906-2148>

**Король Ирина Степановна** – пр. Академический, 4, г. Томск, Россия, 634055;  
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: [irinakorol@yandex.ru](mailto:irinakorol@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

**Irina S. Korol** – 4 Akademichesky Ave., Tomsk, Russia, 634055;  
Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, Tomsk Department,  
Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher;  
e-mail: [irinakorol@yandex.ru](mailto:irinakorol@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

**Мухортина Наталья Андреевна** – пр. Академический, 4, г. Томск, Россия, 634055;  
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
канд. хим. наук, науч. сотрудник;  
e-mail: [volkovana@ipgg.sbras.ru](mailto:volkovana@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

**Natalia A. Mukhortina** – 4 Akademichesky Ave., Tomsk, Russia, 634055;  
Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, Tomsk Department,  
Cand. Sci. (Chemistry), Researcher;  
e-mail: [volkovana@ipgg.sbras.ru](mailto:volkovana@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>