

УДК 556.114.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4497

Шифр специальности ВАК: 02.00.13, 25.00.07

Полиароматические углеводороды малых водоемов Томского района

Д.И. Чуйкина, И.С. Король[✉], Н.А. Мухортина, Ю.В. Колубаева

*Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Томск*

[✉]irinakorol@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Оценка состояния природных вод включает в себя определение целого ряда физико-химических показателей, на основе которых разрабатываются различные индексы и классификации. Однако они не учитывают ряд загрязняющих веществ, оказывающих значительное влияние на состояние водоема, например, полиароматические углеводороды. В статье рассмотрены некоторые аспекты определения приоритетных загрязняющих веществ, к которым относятся полиароматические углеводороды, по критериям экологической опасности: токсичности, канцерогенности, распространенности, частоте встречаемости, источнику происхождения (антропогенному или природному). Учтены гидрохимические показатели, такие как pH, содержание растворенного кислорода, биологического потребления кислорода (БПК₅), содержание ионов для определения качества вод. Проведена попытка оценить влияние полиароматических углеводородов на экологическое состояние водных объектов и учесть их вклад в изменение значений индекса загрязнения вод. Все эти данные показывают актуальность исследования.

Цель: установить состав полиароматических углеводородов в поверхностных водах малых водоемов Томского района для оценки антропогенной нагрузки и показать взаимосвязь с индексами качества природных вод. **Методы:** экстракция, жидкостно-адсорбционная хроматография, высокоэффективная жидкостная хроматография, капиллярный электрофорез, амперометрия, титриметрия. **Результаты.** Исследованы малые озера Томского района на содержание 13 полиароматических углеводородов. Идентификация проводилась методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием. Суммарное содержание полиароматических соединений в изученных пробах поверхностных вод изменяется от 0,37 до 0,54 мкг/л. В смеси полиароматических углеводородов в водных образцах отмечается повышенное содержание легких 2–3-ядерных полиаренов, обладающих лучшей растворимостью (нафталин, флуорен и фенантрен), а также бенз[а]антрацена. Содержание неорганических компонентов, представленных катионами и анионами, не превышает предельно-допустимых концентраций. Рассчитан индекс загрязненности воды; все озера относятся к умеренно загрязненным, ближе к загрязненным. Показана зависимость коэффициента индекса загрязнения вод от содержания высокомолекулярных полиароматических углеводородов и соотношения высокомолекулярных к низкомолекулярным полиароматическим углеводородам. Показано, что чем выше значение коэффициента индекса загрязнения вод, тем выше доля трудноокисляемых компонентов в поверхностных водах.

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

Благодарности: Исследование выполнено в рамках проекта фундаментальных научных исследований Российской академии наук № 0266-2022-0016 «Цифровые гидрогеологические и гидрогеохимические модели нефтегазоносных бассейнов центральных и южных территорий Западной Сибири».

Для цитирования: Полиароматические углеводороды малых водоемов Томского района / Д.И. Чуйкина, И.С. Король, Н.А. Мухортина, Ю.В. Колубаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 216–225. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4497

UDC 556.114.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4497

Polyaromatic hydrocarbons of small reservoirs of the Tomsk region

D.I. Chuikina, I.S. Korol[✉], N.A. Mukhortina, Yu.V. Kolubaeva

*Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences,
Tomsk Department, Tomsk, Russian Federation*

[✉]irinakorol@yandex.ru

Abstract. Relevance. The assessment of the state of natural waters includes the determination of a number of physico-chemical indicators, on the basis of which various indices and classifications are developed. However, they do not take into account a number of pollutants that have a significant impact on the state of the reservoir, for example, polyaromatic hydrocarbons. The article considers some aspects of determining priority pollutants, which include polyaromatic hydrocarbons, according to environmental hazard criteria: toxicity, carcinogenicity, prevalence, frequency of occurrence, source of origin (anthropogenic or natural). Hydrochemical parameters such as pH, dissolved oxygen content, biological oxygen consumption (BPK₅), and ion content are taken into account to determine water quality. An attempt was made to assess the impact of polyaromatic hydrocarbons on the ecological state of water bodies and to take into account their contribution to changes in the values of the water pollution index. All these data prove the relevance of the study. **Aim.** To establish the composition of polyaromatic hydrocarbons in the surface waters of small reservoirs of the Tomsk region to assess anthropogenic load and to show the relationship with the indices of natural water quality. **Methods.** Extraction, liquid adsorption chromatography, high-performance liquid chromatography, capillary electrophoresis, amperometry, titrimetry. **Results.** Small lakes of the Tomsk region were studied for the content of 13 polyaromatic hydrocarbons. The authors have carried out the identification by high-performance liquid chromatography with fluorimetric detection. The total content of polyaromatic compounds in the studied surface water samples varies from 0.37 to 0.54 mcg/l. In the polyaromatic hydrocarbons mixture in aqueous samples, there is an increased content of light 2–3 nuclear polyarenes with better solubility (naphthalene, fluorene and phenanthrene), as well as benz[a]anthracene. The content of inorganic components represented by cations and anions does not exceed the maximum permissible concentrations. The water pollution index was calculated; all lakes are moderately polluted, closer to polluted. The paper demonstrates the dependence of the water pollution index coefficient on the content of high-molecular polyaromatic hydrocarbons and the ratio of high-molecular to low-molecular polyaromatic hydrocarbons. It is shown that the higher the value of the water pollution index coefficient, the higher the proportion of difficult-to-oxidize components in surface waters.

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

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the project of fundamental scientific research of the Russian Academy of Sciences no. 0266-2022-0016 "Digital hydrogeological and hydrogeochemical models of oil and gas bearing basins in the central and southern territories of Western Siberia".

For citation: Chuikina D.I., Korol I.S., Mukhortina N.A., Kolubaeva Yu.V. Polyaromatic hydrocarbons of small reservoirs of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 216–225. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4497

Введение

Современные социально-экономические условия в России требуют более детального решения вопросов, связанных с изучением и контролем качества вод, подготовкой питьевых источников, обработкой и утилизацией осадков, образующихся при очистке вод, обнаружением аварийных загрязнений, идентификацией их источников и ликвидацией последствий. Поверхностные воды являются сложными многокомпонентными природными объектами, требующими многостороннего внимания. Нерациональное ведение сельского хозяйства и

увеличение объема бытовых и промышленных стоков приводит к значительному росту количества биогенных и органических веществ, поступающих в водоемы, что ведет к увеличению трофического статуса водоемов, сокращению их биологического разнообразия и ухудшению качества воды. Дополнительной причиной эвтрофирования является поступление биогенов на территорию водосборов с атмосферным переносом [1]. Особую опасность таит в себе поступление в водные экосистемы токсических веществ. В последние годы наблюдается усиленное загрязнение водоемов тяжелыми метал-

лами, фенолами, нефтепродуктами и другими токсикантами. Гидрогеологические показатели не могут дать полного представления о токсичности среды, они не учитывают синергетические, кумулятивные или антагонистические эффекты от одновременного присутствия многих загрязнителей и поэтому не могут служить надежной основой для прогнозирования экологических последствий загрязнения.

Содержание химических веществ в поверхностных водах зависит от гидрологических, геохимических, антропогенных факторов, а также сезонной изменчивости, поэтому они являются сложным объектом для исследований и любого вида оценок, особенно количественных. Классификация состояния природных вод основывается на определении целого ряда физико-химических показателей, включающих в себя температуру, pH, Eh, содержание ионов, тяжелых металлов, нефтяных компонентов и др. В России и странах ЕЭС для оценки качества природных вод используют различные индексы и классификации. Например, индекс загрязненности воды (ИЗВ), баварский индекс (CJ), канадский индекс (CCME WQI) и классификации «Единые критерии качества вод» (ЕККВ), «Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды» (УКИЗВ) [2].

Однако они не учитывают содержание полиароматических углеводородов (ПАУ), которые являются канцерогенными соединениями и проявляют мутагенные и токсичные свойства. ПАУ сорбируются и консервируются в донных отложениях водоемов, что позволяет использовать их в качестве индикаторов для оценки антропогенного воздействия на природные водные объекты. В работах [3, 4] показано, что соотношения ПАУ могут использоваться не только как индикаторы источников поступления в водоем, но и как критерий качества водного объекта. Используя соотношение содержания тяжелых металлов и ПАУ в осадках можно оценить экологические риски [5]. Применение таких показателей, как pH, содержание растворенного кислорода, БПК₅, содержание ионов, позволяет оценивать не только качество вод, но и трофический статус водоема [6]. Все эти данные показывают актуальность исследования.

Цель данной работы – установить состав ПАУ в поверхностных водах малых водоемов Томского района для оценки антропогенной нагрузки и показать взаимосвязь с индексами качества природных вод.

Объекты исследования

Для исследования были отобраны пробы поверхностных вод пяти малых водоемов Томского района [7], расположенных в 30-ти километровой

зоне от г. Томска и используемых горожанами для мест активного отдыха и рыбной ловли (рис. 1).



Рис. 1. Схема точек отбора проб малых озёр
Fig. 1. Diagram of sampling points of small lakes

Пруд «Савинское озеро» был сформирован плотинной-запрудой в 70-е гг. XX в. Имеет форму неправильного прямоугольника, вытянутого от плотины с северо-востока на юго-восток, ширина озера составляет около 230 м, длина до 1000 м. Общая площадь водного зеркала водоёма – 175000 м². Наибольшие глубины южнее плотины зафиксированы на отметках 5–7 м, питание внешними водами с полей, 1,5–2 км восточнее посёлка Зональная Станция и в 2 км западнее деревни Трубочёво. Плотина через природную ложину является одной из дорог между пригородными садоводческими товариществами «Весна» (на севере) и «Красивый пруд» (на юге, восточный берег Савинского озера).

Федосеевское озеро – искусственный водоём (пруд), сформированный плотинной-запрудой, собирающей воды с окружающих лесных и сельскохозяйственных пространств в месте в юго-восточной части территории села Богашёво Томского района. Общая площадь водного зеркала водоёма составляет при минимальном заполнении засушливым летом 1320 м², а при максимальном майском наполнении 2650 м². Наибольшие глубины – около 2–2,5 м. Восточный обрывистый берег водоёма проходит по части границы природного заказника «Богашёвский кедровник».

Озеро Песчаное – природный уникальный водоём в сосновом лесу Тимирязевского бора (к юго-западу от с. Тимирязевское), Томский район. Озеро имеет почти идеально круглую форму, диаметром около 300 м, глубиной до 3,5 м, берега песчаные. Северо-восточный берег озера застроен домами, южный и юго-западный заболочен. Вода малопрозрачная желтого цвета. В последние годы озеро

подвержено значительному высыханию и зарастанию ряской, и местные дачники ежегодно очищают его и поддерживают уровень водой из рядом находящейся скважины.

Озера Мальцево и Круглое находятся в поселке Самусь Томского района и входят в единую озерную систему, соединенную между собой протокой, приурочены к поверхности второй надпойменной террасы реки Томи, в рельефе располагаются каскадом. Оба озера имеют песчаное дно, вода в них насыщенного коричневого оттенка, питание озер – ручьи, берущие свое начало в торфяных болотах. Озеро Мальцево имеет круглую форму, диаметром около 800 м, максимальная глубина – 5 м, площадь водного зеркала около 280000 м². Озеро Круглое небольшое, диаметр около 600 м, наибольшие глубины составляют 3,5–4 м, площадь водного зеркала около 230000 м².

Материалы и методы исследования

Отбор проб воды проводили в августе 2022 г. с глубины 0,4–0,6 м от поверхности в стеклянную емкость с последующей консервацией н-гексаном. По требованиям аналитических испытаний было отобрано по три пробы с каждой точки отбора.

Определение содержания ПАУ в водном образце проводили в соответствии с действующей методикой государственного экологического контроля ПНД Ф 14.1:2:4.70-96. ПАУ выделяли трехкратной экстракцией н-гексаном из 1 литра пробы с последующей очисткой экстракта методом колоночной хроматографии на оксиде алюминия II ст. активности. Полученный экстракт упаривали до следовых количеств гексана, доводили объем пробы до 1 мл ацетонитрилом. Содержание ПАУ в воде определяли с использованием метода высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе Shimadzu LC-20 (Shimadzu, Япония) с одновременным диодноматричным и флуоресцентным детектированием, на обращенно-фазовой колонке 150*4,6 мм SupelcoSil LC-PAH, фаза C18, размер частиц 5 мкм. В качестве элюента использовали смесь ацетонитрила (1 сорт) и бидистиллированной воды. Хроматографирование проводили в градиентном режиме: ацетонитрил/вода=(50:50)–(100:0) первые 20 минут, 100 % ацетонитрила с 20-ой по 40-ю минуту анализа. Скорость потока растворителя составляла 1 мл/мин, объем пробы 20 мкл, рабочая температура колонки 40 °С. Время анализа в выбранных условиях 32 минуты. Спектры фиксировали в интервале 190–500 нм, с регистрацией сигнала на длине волны 254 нм для количественного определения изучаемых компонентов. В пробах поверхностных вод изученных озер были количественно определены в порядке выхода на хроматограммах следующие индивидуальные ПАУ: нафта-

лин (Naphthalene), 2-метилнафталин (2-methylnaphthalene), флуорен (Fluorene), фенантрен (Phenanthrene), антрацен (Anthracene), флуорантен (Fluoranthene), пирен (Piren), бенз[а]антрацен (Benz[a]anthracene), хризен (Chrysene), бенз[б]-флуорантен (Benz[b]fluoranthene), бенз[к]флуорантен (Бенз[к]флуорантен), бенз[а]пирен (Benz[a]pyrene), дибенз[а, h]антрацен (Dibenz[ah]anthracene).

В соответствии с методиками ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.74-2012, ПНД Ф 14.1:2:4.167-000, ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18, ПНД Ф 16.1:2:2.3:2.2.69-10 определены массовые концентрации ионного состава воды. Для капиллярного электрофореза образцы воды были подготовлены согласно требованиям работы на приборе «Капель-205» и отфильтрованы на мембранном ацетатно-целлюлозном фильтре пористостью 0,40 мкм (Владипор, Россия). Испытания проводили с использованием системы капельного электрофореза «Капель-205» (Люмэкс, Россия). Нижний порог обнаружения составил 0,004 мг/л.

Биологическое потребление кислорода определяли согласно НДП 10.1:2:3.131-2016 «Методика определения биохимического потребления кислорода после 5 дней инкубации (БПК₅) в пробах питьевых, природных и сточных вод амперометрическим методом».

Все пробы были проанализированы не менее трех раз. В статье указаны средние значения.

Результаты и обсуждение

Изучаемые водоемы находятся в непосредственной близости от жилых массивов (г. Томск, п. Самусь, п. Богашево, с. Тимирязевское), в связи с чем испытывают влияние хозяйственной деятельности человека. Проведенные исследования водных образцов озер Мальцево, Круглое, Савинское, Федосеевское и Песчаное позволили оценить их текущее состояние по ряду гидрологических показателей. В момент отбора проб значения температурного показателя зафиксированы в интервале 18–21 °С, что является нормой для данного времени года. Величины pH озер Мальцево, Круглое, Савинское, Федосеевское и Песчаное находятся в диапазоне 6,8–7,2. Водные объекты характеризуются как пресноводные потоки. Показатель электропроводности Eh равен соответственно 0,26; 0,28; 0,34; 0,30; 0,14 мСм/см.

Изучение катионно-анионного состава поверхностных вод необходимо для оценки экологического состояния этих объектов, в том числе для возможности определения антропогенного загрязнения [8]. В работе [9] показано, что на химический состав воды оказывает влияние не только антропогенная нагрузка, но и изменения климатических условий.

Таблица 1. Ионный состав малых озер Томского района

Table 1. Ionic composition of small lakes in the Tomsk region

Озера/Lakes	Содержание, мг/л/Content, mg/l								
	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Мальцево/Maltsevo	2,62	1,36	<0,2	<0,2	<0,1	1,83	2,25	2,83	0,96
Круглое/Krugloe	2,81	2,66	<0,2	<0,2	<0,1	2,41	1,94	3,47	0,98
Савинское/Savinskoe	3,91	14,98	<0,2	<0,2	0,21	10,23	2,52	36,76	7,00
Федосеевское/Fedosееvskoe	2,91	2,51	<0,2	<0,2	0,20	6,13	1,22	52,19	9,48
Песчаное/Peschanoe	0,56	0,43	<0,2	<0,2	0,38	6,78	0,13	16,35	5,11
ПДК/МРС	100	300	3,5	45	1,5	200	200	180	50

Методом капиллярного электрофореза был определен ионный состав, включающий: основные катионы: Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, и анионы: Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, F⁻. Результаты представлены в табл. 1.

Многолетними исследованиями ученых состава основных ионов (макрокомпонентов) в водных объектах показало, что их содержание в природных водах может изменяться в очень широком диапазоне от ультрапресных до рассолов. Таким образом показано, что на территориях Рдейского, Дарвинского заповедников в малых озерах среднее содержание Ca²⁺ находится в интервале 1,5–3,6 мг/л, Mg²⁺ 1,3–1,4 мг/л, Na⁺ 0,8–1,2 мг/л [10]. В работе [11] установлено, что химический состав вод малых озер, расположенных на территории нефтедобывающих районов, отличается повышенным содержанием ионов NO₃⁻ и PO₄³⁻ (1,432 и 0,417 г/л соответственно). Именно повышенные концентрации в водных объектах соединений азота и фосфора, превышающие значения ПДК, указывают на загрязнение промышленными и бытовыми стоками.

Анализируя полученные данные, следует отметить, что концентрация биогенных ионов NO₃⁻ и PO₄³⁻ в изученных озерах Томского района не превышает нормы предельно-допустимых концентраций 4,5 и 3,5 мг/л соответственно. Низкое содержание NO₃⁻ может быть связано с деятельностью природных микроорганизмов, в частности денитрифицирующих бактерий [11], содержание которых в воде и донных отложениях нами не анализировалось.

Результаты исследования указывают на удовлетворительное качество природных вод по показателям катионно-анионного состава. Содержание всех определённых катионов и анионов не превышает ПДК (табл. 1) [12].

Для оценки экологического состояния водных объектов важно учитывать содержание полиароматических углеводородов, которые характеризуются сочетанием токсичных и канцерогенных свойств при их широком распространении и различном происхождении (как природном, так и антропогенном). Авторами [13] показано, что значительной канцерогенной и мутагенной активностью обладают соединения с пятичленными кольцами, например бенз[а]пирен, бенз[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен, ди-

бенз[аh]антрацен. В литературе содержится информация о том, что 5–6 циклические ароматические соединения имеют техногенное происхождение, в то время как более легкие 3–4 циклические ПАУ образовались в результате биохимической трансформации органического сырья (гумуса или наземной высшей растительности) [14, 15]. К сожалению, в Российской Федерации отсутствует достаточная аналитическая база для разработки нормированных документов по предельно допустимым концентрациям полиароматических углеводородов.

В пробах поверхностных вод изученных озер были количественно определены приоритетные индивидуальные ПАУ, рассчитано их относительное содержание; результаты представлены в табл. 2.

Смесь приоритетных ПАУ водных образцов исследуемых водоемов наиболее обогащена такими соединениями, как флуорен, фенантрен и флуорантен. В целом в воде преобладают более легкие двух и трехядерные полиарены, обладающие лучшей растворимостью [13]. Для озер Федосеевское и Савинское установлено повышенное содержание флуорена до 0,12 мкг/л, флуорантена до 0,09 мкг/л и дибенз[аh]антрацена до 0,08 мкг/л.

Для всех изученных озер подтверждается закономерность о количественном преобладании флуорантена над пиреном за счет его лучшей растворимости в воде [13, 16].

Озеро Песчаное отличается минимальным суммарным содержанием ПАУ, однако для этого водоема характерно максимальное содержание фенантрена, происхождение которого может быть связано с пирогенными процессами хозяйственно-бытовой деятельности. Рекомендованное значение фоновой концентрации фенантрена 0,4 мг/л [13]. Кроме того, в этой же работе показано, что почвы способны генерировать фенантрен и хризен из погребенной в них биомассы.

Экологическое состояние водных объектов вызывает интерес во всем мире. В работах [17, 18] приведены данные о суммарном содержании ПАУ в городских водоемах Китая (оз. Донг – 0,013 мкг/л и оз. Тансюнь – 0,989 мкг/л), а в питьевых водах других городов Китая их концентрация находится в диапазоне от 0,004 до 0,231 мкг/л [19].

Таблица 2. Среднее содержание ПАУ в поверхностных водах малых озер Томского района, (в числителе – абсолютное содержание, мкг/л; в знаменателе – относительное, %)

Table 2. Average content of polyaromatic hydrocarbons PAHs in the surface waters of small lakes in the Tomsk region (in the numerator – absolute content, µg/l; in the denominator – relative, %)

ПАУ/PAHs	Мальцево Maltsevo	Круглое Krugloe	Савинское Savinskoe	Федосеевское Fedoseevskoe	Песчаное Peschanoe
Нафталин* Naphthalene	0,04 10,26	0,04 9,20	0,02 4,51	0,02 4,18	0,03 8,42
2-метилнафталин 2-methylnaphthalene	0,05 12,82	0,03 5,75	0,04 7,67	0,02 4,07	0,03 7,54
Флуорен Fluorene	0,04 10,26	0,08 17,24	0,12 21,51	0,12 28,32	0,03 7,46
Фенантрен Phenanthrene	0,09 21,79	0,08 17,24	0,06 11,84	0,03 7,72	0,10 26,84
Антрацен Anthracene	0,00 0,00	0,00 0,00	следы (traces) 0,17	0,01 1,78	следы (traces) 0,27
Флуорантен Fluoranthene	0,05 11,54	0,06 12,64	0,06 10,77	0,09 21,64	0,07 17,98
Пирен Piren	0,02 3,85	0,02 4,60	0,01 1,95	0,02 5,02	0,03 7,31
Бенз[а]антрацен Benz[a]anthracene	0,03 6,41	0,05 11,49	0,03 6,10	0,02 5,71	0,04 10,46
Хризен Chrysene	0,02 5,13	0,03 6,90	0,02 3,26	0,02 4,69	0,03 6,97
Бенз[б]флуорантен Benz[b]fluoranthene	0,03 6,41	0,01 2,30	0,04 7,91	0,01 1,78	следы (traces) 0,33
Бенз[к]флуорантен Benz[k]fluoranthene	0,02 3,85	0,01 1,15	0,04 6,71	0,01 1,85	следы (traces) 0,16
Бенз[а]пирен** Benz[a]pyrene	0,01 2,56	0,01 2,30	0,02 3,57	0,01 2,70	0,01 1,84
Дибенз[аh]антрацен Dibenz[ah]anthracene	0,02 5,13	0,04 9,20	0,08 14,02	0,04 10,54	0,02 4,41
ΣНМ/ΣLMW	0,22	0,22	0,25	0,19	0,19
ΣВМ/ΣНМW	0,18	0,22	0,29	0,23	0,18
ΣПАУ/ΣРАHs	0,40	0,44	0,54	0,42	0,37

Согласно рекомендациям СанПин 1.2.3685-21:
*содержание нафталина в воде не должно превышать 10 мкг/л, ** бенз[а]пирена – 0,01 мкг/л.

Антропогенное влияние распространяется не только на густонаселенные территории, но и на удаленные уникальные регионы, такие как архипелаг Шпицберген. В озере Стамме, расположенном на территории этого архипелага, установлено, что среднее суммарное содержание ПАУ находится в пределах 0,002–0,29 мкг/л, а в летне-осенний период увеличивается до 0,713 мкг/л [20]. В поверхностных водах озера Байкал концентрации ПАУ колеблются от 0,03 до 0,13 мкг/л [21].

Суммарное содержание ПАУ подвержено сезонным колебаниям [20], для изучаемых малых озер Томского района в поверхностных водах оно изменяется от 0,37 до 0,54 мкг/л. Нами показано,

что в водных образцах, отобранных в августе 2022 г., количество ПАУ находится в интервале концентраций типичных для летнего сезона, вне зависимости от антропогенной нагрузки.

На основании гидрохимических показателей (рН, БПК₅, содержание растворенного кислорода, макрокомпонентных ионов, фенола, нефтепродуктов и др.) предложены различные интегральные количественные индексы для определения качества воды, например: удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ); индекс качества воды (ИКВ), индекс загрязненности воды; индексы загрязненности рек металлами и токсичными веществами; индекс потенциального загрязнения воды; общесанитарные индексы качества воды; индекс токсичности и др. [22]. Оценка качества природных вод с использованием различных коэффициентов и индексов проводится во всем мире. Для оценки качества воды в Австралии используется индекс WSC [23], в Южной Индии благодаря индексу загрязнения подземных вод (PIG) и индексу качества воды (WQI) проводится пространственная оценка качества подземных вод [24].

В нашей работе мы использовали один из наиболее распространенных показателей в России: индекс загрязнения воды [25], для расчета которого использовали содержание растворенного кислорода, БПК₅, ионно-катионный состав воды из табл. 3.

Таблица 3. Гидрохимические показатели малых озер Томского района, используемые для расчета индекса загрязненности воды (ИЗВ)

Table 3. Hydrochemical indicators of small lakes in the Tomsk region used to calculate water pollution index (WPI)

Показатель Index	малые озера Томского района small lakes of the Tomsk region				
	Мальцево Maltsevo	Круглое Krugloe	Савинское Savinskoe	Федосеевское Fedoseevskoe	Песчаное Peschanoe
БПК ₅ (мгО ₂ /л)/BOD ₅ (mgO ₂ /l)	3,1	3,8	3,5	3,4	3,1
Раств. кислород (мг/л) DO (mg/l)	7,3	7,3	8,1	7,8	7,5
Ca ²⁺ (мг/л/mg/l)	2,83	3,47	36,76	52,19	16,35
Mg ²⁺ (мг/л/mg/l)	0,96	0,98	7,00	9,48	5,11
Cl ⁻ (мг/л/mg/l)	1,36	2,66	14,98	2,51	0,43
SO ₄ ²⁻ (мг/л/mg/l)	2,62	2,81	3,91	2,91	0,56
ИЗВ/WPI	1,74	1,86	2,00	1,95	1,80

Важно учитывать, что при расчете ИЗВ из всех используемых параметров наибольший вклад вносят в индекс экспериментально определенные значения растворенного кислорода и биологического потребления кислорода, определенное на 5 сутки. По значениям коэффициента ИЗВ для водных объектов

рекомендовано классифицировать природные воды на шесть классов, представленных в табл. 4 [25].

Таблица 4. Характеристики интегральной оценки качества воды

Table 4. Characteristics of water quality integral assessment

Воды Water	Значения ИЗВ WPI values	Классы качества вод Water quality classes
Очень чистые/Very clean	$\leq 0,2$	I
Чистые/Clean	$>0,2-1,0$	II
Умеренно загрязненные Moderately polluted	$1,0-2,0$	III
Загрязненные/Polluted	$2,0-4,0$	IV
Грязные/Dirty	$4,0-6,0$	V
Очень грязные/Very dirty	$6,0-10,0$	VI
Чрезвычайно грязные Extremely dirty	>10	VII

Показатель ИЗВ для малых озер Томского района изменяется от 1,74 до 2,0. В соответствии с табл. 4 изученные водоемы можно отнести к III классу умеренно загрязненных, ближе к загрязненным.

Следует отметить, что есть ряд потенциально опасных загрязняющих веществ, которые оказывают серьёзное токсикологическое воздействие на организм человека и природу, но не нормируются и не учитываются в различных коэффициентах и индексах, используемых для оценки качества воды. К таким веществам относят индивидуальные ПАУ. Показатель БПК₅ используется для оценки содержания в воде растворенного органического вещества природного и антропогенного происхождения, которое наиболее легко окисляется. Полиароматические углеводороды, имеющие в своем составе более трех ароматических колец (флуорантен, пирен и другие), относятся к высокомолекулярным, являются основными представителями трудно-окисляемой, растворенной органической компоненты и практически не учитываются при определении БПК₅ [13, 25].

Поскольку высокомолекулярные ПАУ обладают более высоким токсикологическим воздействием на организм человека, чем низкомолекулярные [10, 15, 25], в нашей работе проведена попытка проследить их влияние на изменение значений ИЗВ. На рис. 2 представлена зависимость коэффициента ИЗВ от соотношения высокомолекулярных ПАУ к низкомолекулярным (ВМ/НМ).

Соотношение ВМ/НМ для поверхностных вод изучаемых озер Томского района находится в интервале 0,81–1,21. Значения ВМ/НМ >1 указывают на преобладание высокомолекулярных ПАУ с числом колец более 3 над низкомолекулярными. Известно, что высокомолекулярные ПАУ обладают большей стабильностью и медленной трансформа-

цией, более способны к накоплению в природных объектах и дают возможность при систематическом наблюдении за этими соединениями выявить направленность процессов, происходящих при загрязнении водных объектов. Отношение ВМ/НМ ПАУ в водном образце может дать информацию, коррелирующую с коэффициентами оценки качества природных вод, как показано на рис. 2.

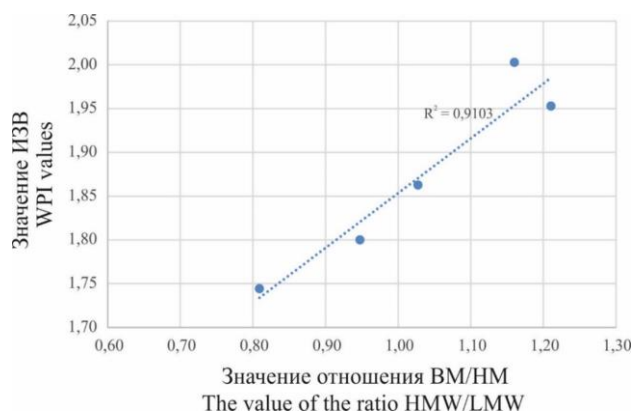


Рис. 2. Соотношение ВМ/НМ к ИЗВ для малых озер Томского района

Fig. 2. VM/LM ratio to WPI for small lakes of the Tomsk region

Проведенные исследования позволяют оценить текущее экологическое состояние малых озер Томского района с учетом вклада полиароматических углеводородов. Значения предельно допустимых концентраций ПАУ на территории РФ [25], в странах Европы и США [2] различаются из-за разных методологий проведения экологического мониторинга, а также имеющейся информации об уровне их канцерогенности и генотоксичности. Для всех исследованных малых озер Томского района содержание приоритетных ПАУ по нормируемым в РФ показателям находится ниже или на уровне установленного ПДК (для нафталина 10 мкг/л и для бенз[а]пирена 0,01 мкг/л). Исключение составляет озеро Савинское, в котором содержание бенз[а]пирена определено как 0,02 мкг/л и превышает ПДК в 2 раза. Содержание других полиароматических углеводородов в РФ, к сожалению, пока не регламентируется.

Для изучаемых малых водоемов рассчитано значение ИЗВ и показана его зависимость от соотношения ВМ/НМ ПАУ. По значениям коэффициента ИЗВ состояние изученных озер позволяет отнести их к категориям умеренно загрязненных или загрязненных. Предложенные показатели дают возможность рассматривать их как эффективные маркёры для дальнейшей оценки и сравнения состояния с другими водными экосистемами Томского района.

Использование ПАУ в поверхностных водах в сравнении с общепринятыми показателями качества воды представляет собой новый подход для экологического мониторинга, основанный на выявлении источников

загрязнения и наблюдении связей между ними. Предложенный комплексный подход может оказаться эффективным для оценки экологического состояния озера и стать основой для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миграционные потоки биогенных элементов в геосистеме «водосбор – водный объект» в современных условиях / Е.А. Минакова, А.П. Шлычков, С.А. Кондратьев, В.З. Латыпова // *Геоэкология*. – 2022. – № 2. – С. 13–21. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-13-21
2. Кимстач В.А. Классификации качества поверхностных вод в странах Европейского экономического сотрудничества. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 48 с.
3. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition / M.B. Yunkera, R.W. Macdonald, R. Vingarzac, R.H. Mitchell, D. Goyette, S. Sylvestre // *Organic Geochemistry*. – 2002. – Vol. 33 – P. 489–515. DOI: 10.1016/S0146-6380(02)00002-5
4. Семенов М.Ю., Мариняйтэ И.И., Жученко Н.А. Выявление источников и путей поступления полициклических ароматических углеводородов в поверхностные воды на основе данных химического мониторинга // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. – 2017. – № 1. – С. 40–49.
5. 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: 10.1007/s00244-018-0513-2
6. Freshwater lakes in the Western Himalayan Region: an analysis of the present situation / Neha Kumari, Kushal Thakur, Rakesh Kumar, Sunil Kumar, Danish Mahajan, Bhavna Brar, Dixit Sharma, Amit Kumar Sharma // *Water-Energy Nexus*. – 2023. – Vol. 6. – P. 18–31. DOI: 10.1016/j.wen.2023.06.002
7. 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.
8. Сагдеев М.А., Чигринина Н.А., Сальникова В.И. Определение содержания катионов и анионов в питьевой воде методом капиллярного электрофореза // *Совр. науч. иссл. и инновации*. – 2017. – № 3 (71). – С. 36–39.
9. 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. – P. 167750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167750
10. 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: 10.7868/S032105961403016X
11. 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: 10.17513/use.37158
12. Санитарные нормы и требования СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». – М.: Госсанэпидемнадзор России, 2021. – 469 с.
13. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклоароматических углеводородов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 233 с.
14. Опекунов Е.В., Митрофанова Е.С., Санни С. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях рек и каналов С-Петербурга // *Вестник С-Пб. универ.* – 2015. – Сер. 7. – Вып. 4. – С. 98–109.
15. 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: 10.23670/IRJ.2020.96.6.050
16. Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the arctic/ L.O. Reiersen, S. Wilson, Yu. Sychev, J. Pawlak, I. Utne // *Arctic Monitoring and Assessment Programme*. – Oslo: AMAP, 2007. – Ch. 4. – 87 p.
17. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the water bodies of Dong Lake and Tangxun Lake, China: spatial distribution, potential sources and risk assessment / Kuo Yao, Zhanling Xie, Lihao Zhi, Zefan Wang, Chengkai Qu // *Water*. – 2023. – Vol. 15 (13). – P. 2416. DOI: 10.3390/w15132416
18. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study / Q. Song, Z. Xue, H. Wu, Y. Zhai, T. Lu, X. Du, J. Zheng, H. Chen, R. Zuo // *Environmental Research*. – 2023. – Vol. 216. – Pt. 4. – P. 114816. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114816
19. 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: 10.1016/j.ecoenv.2019.03.119
20. Пресноводные ресурсы западного Шпицбергена в современных условиях (многолетние исследования ААНИИ): монография / М.В. Третьяков, В.А. Брызгалов, Е.В. Румянцева, К.В. Ромашова. – СПб.: ААНИИ, 2021. – 201 с.
21. Современный уровень нефтепродуктов в воде оз. Байкал и его притоков / А.Г. Горшков, И.И. Мариняйтэ, Т.И. Земская, Т.В. Ходжер // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2010. – № 18. – С. 711–718.
22. Зубарев В.А. Гидрохимические индексы оценки качества поверхностных вод // *Региональные проблемы*. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 71–77.
23. Water Sensitive Cities Index: a diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions / B.C. Rogers, G. Dunn, K. Hammer, W. Novalia, F.J. de Haan, L. Brown, R.R. Brown, S. Lloyd, C. Ulrich, T.H.F. Wonga, C. Chesterfield // *Water Research*. – 2020. – P. 116411. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116411

24. Sunitha V., Muralidhara Reddy B. 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. – № 41. DOI: 10.1007/s13201-021-01527-w
25. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы / сост. О.В. Гагарина. – Ижевск: Изд-во Удмуртского университета, 2012. – 199 с.

Информация об авторах

Дарья Ивановна Чуйкина, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований кернов и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. dichuikina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5906-2148>

Ирина Степановна Король, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований кернов и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. irinakorol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Наталья Андреевна Мухортина, младший научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований кернов и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. volkovana@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Юлия Викторовна Колубаева, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеохимии и геоэкологии Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. kolubaeva@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7934-5172>

Поступила в редакцию: 12.12.2023

Поступила после рецензирования: 20.04.2024

Принята к публикации: 27.09.2024

REFERENCES

1. Minakova E.A., Shlychkov A.P., Kondratyev S.A., Latypova V.Z. Migration flows of nutrient elements in the geosystem “catchment area–water body” in modern conditions. *Geoecology*, 2022, no. 2, pp. 13–21. (In Russ.) DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-13-21
2. Kimstach V.A. *Classifications of surface water quality in the countries of the European Economic Community*. St Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. 48 p. (In Russ.)
3. Yunkera M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry*, 2002, vol. 33, pp. 489–515. DOI: 10.1016/S0146-6380(02)00002-5
4. Semenov M.Yu., Marinayte I.I., Zhuchenko N.A. Identification of sources and routes of entry of polycyclic aromatic hydrocarbons into surface waters based on chemical monitoring data. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2017, no. 1, pp. 40–49. (In Russ.)
5. 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, pp. 395–407. DOI: 10.1007/s00244-018-0513-2
6. Neha Kumari, Kushal Thakur, Rakesh Kumar, Sunil Kumar, Danish Mahajan, Bhavna Brar, Dixit Sharma, Amit Kumar Sharma. Freshwater lakes in the Western Himalayan Region: an analysis of the present situation. *Water-Energy Nexus*, 2023, vol. 6, pp. 18–31. DOI: 10.1016/j.wen.2023.06.002
7. Ioganzen B.G., Popov M.A., Yakubova A.I. Reservoirs in the vicinity of the city of Tomsk. From a series of works on the study of the biological productivity of water bodies in Siberia. *Proceedings of Tomsk University*, 1951, vol. 115, pp. 121–190. (In Russ.)
8. Sagdeev M.A., Chigrineva N.A., Salnikova V.I. Study of the cation-anionic composition of water by the method of capillary electrophoresis. *Modern scientific research and innovation*, 2017, vol. 71, no. 3, pp. 36–39. (In Russ.)
9. 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, 167750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167750
10. Tomilina I.I., Gremyachikh V.A., Grebenyuk L.P. Ecotoxicological monitoring in lakes of northwestern and central European Russia situated in specially protected natural areas. *Water Resources*, 2014, vol. 41, no. 3, pp. 304–311. (In Russ.) DOI: 10.7868/S032105961403016X
11. Agbalyan E.V., Shinkaruk E.V. Chemical composition of water of small lakes of oil and gas diving regions of the north of Western Siberia. *Advances of modern natural science*, 2019, no. 7, pp. 45–51. (In Russ.) DOI: 10.17513/use.37158
12. *Sanitary standards and requirements SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans*. Moscow, State Sanitary and Epidemiological Surveillance of Russia Publ., 2021. 469 p. (In Russ.)
13. Rovinskiy F.Ya., Teplitskaya T.A., Alekseyeva T.A. *Background monitoring of polycycloaromatic hydrocarbons*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 233 p. (In Russ.)

14. Opekunov A.Yu., Mitrofanova E.S., Sanni S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in bottom sediments of rivers and canals of St. Petersburg. *Vestnik St. Petersburg University*, 2015, Iss. 7, no. 4, pp. 98–109. (In Russ.)
15. Khalikov I.S., Lukyanova N.N. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in bottom sediments of Baikal lake according to results of monitoring in 2017–2018. *International Scientific Research Journal*, 2020, no. 6-2 (96), pp. 69–73. (In Russ.)
16. Reiersen L.O., Wilson S., Sychev Yu., Pawlak J., Utne I. *Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the arctic*. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, AMAP, 2007. Ch. 4, 87 p.
17. Kuo Yao, Zhanling Xie, Lihao Zhi, Zefan Wang, Chengkai Qu. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water Bodies of Dong Lake and Tangxun Lake, China: spatial distribution, potential sources and risk assessment. *Water*, 2023, vol. 15 (13), no. 2416. DOI: 10.3390/w15132416.
18. Song Q., Xue Z., Wu H., Zhai Y., Lu T., Du X., Zheng J., Chen H., Zuo R. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: a case study. *Environmental Research*, 2023, vol. 216, Iss. 4, 114816. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114816
19. 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, pp. 108–116. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.03.119
20. Tretyakov M.V., Bryzgalo V.A., Rumyantseva E.V., Romashova K.V. *Freshwater resources of western Spitsbergen in modern conditions (long-term research by AARI)*. Monografiya. St Peterburg, AANII Publ., 2021. 201 p. (In Russ.)
21. Gorshkov A.G., Marinayte I.I., Zemskaya T.I., Khodzher T.V. The current level of petroleum products in the water of the lake Baikal and its tributaries. *Chemistry for sustainable development*, 2010, no. 18, pp. 711–718. (In Russ.)
22. Zubarev V.A. Hydrochemical indices for assessing the quality of surface waters. *Regional problems*, 2014, vol. 17, no. 2, pp. 71–77. (In Russ.)
23. Rogers B.C., Dunn G., Hammer K., Novalia W., De Haan F.J., Brown L., Brown R.R., Lloyd S., Urich C., Wonga T.H.F., Chesterfield C. Water Sensitive Cities Index: a diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions. *Water*, 2020, vol. 186, 116411. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116411
24. Sunitha V., Muralidhara R.B. 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, no. 41. DOI: 10.1007/s13201-021-01527-w
25. *Assessment and regulation of natural water quality: criteria, methods, existing problems*. Compiler O.V. Gagarina. Izhevsk, Udmurt University Publ. House, 2012. 199 p. (In Russ.)

Information about the authprs

Daria I. Chuikina, Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. dichuikina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5906-2148>

Irina S. Korol, Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. irinakorol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Natalia A. Mukhortina, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. volkovana@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Yuliya V. Kolubaeva, Cand. Sc., Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Department, 4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. kolubaeva@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7934-5172>

Received: 12.12.2023

Revised: 20.04.2024

Accepted: 27.09.2024