

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-384-393>



Поступила 01.08.2024

Поступила после рецензирования 23.08.2024

Принята в печать 27.08.2024

© Абрамова Л. С., Козин А. В., Гусева Е. С., 2024

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

## НОВЫЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА: РИСКИ ПРИ МИГРАЦИИ ЛОСОСЕВЫХ ВИДОВ РЫБ. ОБЗОР

Абрамова Л. С., Козин А. В.\*, Гусева Е. С.

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

лососевые виды рыб,  
факторы риска,  
сточные воды,  
биоаккумуляция,  
масс-спектрометрия,  
омикс-технологии

Попадание в окружающую среду загрязняющих веществ является серьезной экологической проблемой в связи со значительными рисками, которые они представляют как для экосистем, так и для здоровья человека. В обзоре рассматриваются вопросы выявления и распространения новых загрязняющих веществ, а также источники их поступления в окружающую среду и потенциальное воздействие на экосистемы. Особую актуальность проблема загрязнения сточных вод приобретает в контексте сохранения лососевых видов рыб. Фармацевтические и ветеринарные препараты, компоненты средств личной гигиены, микропластик, пер- и полифторированные вещества, бромированные антипирены, нефть и ряд других токсикантов попадают в пресные водоемы, которые особенно важны для ранних этапов развития лосося и его дальнейшей миграции. Присутствие загрязняющих веществ в водной среде зависит от источника, от способности их к биоаккумуляции, а также к деградации в процессах биологической и абиотической очистки. Для определения новых загрязнителей может быть рекомендована масс-спектрометрия высокого разрешения в сочетании с газовой или жидкостной хроматографией. Этот метод, благодаря высокой точности измерения масс и высокой избирательности, способен эффективно идентифицировать загрязнители даже в сложной рыбной матрице. При проведении нецелевого и целевого скрининга с высокочувствительным полным сканированием целесообразно использовать масс-анализаторы высокого разрешения (TOF, Q-TOF, Q-Orbitrap), позволяющие определять целый ряд новых соединений. Перспективным направлением при комплексной оценке влияния загрязнителей на лососевые виды рыб и при выявлении индикаторов, характеризующих это влияние, является метаболомика. Она основана на изучении низкомолекулярных органических соединений — метаболитов, как промежуточных, так и конечных продуктов обмена в жидкостях и тканях организма. Метаболомное профилирование позволяет выявить важные маркеры состояния водного объекта под воздействием загрязнителей, что необходимо для разработки всеобъемлющих нормативных актов и руководств по эффективному обращению с этими загрязнителями.

Received 01.08.2024

Accepted in revised 23.08.2024

Accepted for publication 27.08.2024

© Abramova L. S., Kozin A. V., Guseva E. S., 2024

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

## EMERGING POLLUTANTS: RISKS IN SALMON FISH MIGRATION. A REVIEW

Liubov S. Abramova, Andrei V. Kozin\*, Elena S. Guseva

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Moscow, Russia

### KEY WORDS:

salmonid fish  
species, risk factors,  
wastewater,  
bioaccumulation, mass  
spectrometry, omics  
technologies

### ABSTRACT

The release of pollutants into the environment is a serious ecological problem due to the significant risks they pose both to ecosystems and to human health. The review considers the issues of detection and distribution of new pollutants, as well as sources of their entry into the environment and potential impact on ecosystems. The problem of wastewater pollution is especially urgent in the context of conservation of salmonid fish species. Pharmaceutical and veterinary drugs, components of personal hygiene products, microplastics, per- and polyfluorinated substances, brominated flame retardants, oil and a number of other toxicants enter freshwater bodies, which are especially important for the early stages of the salmon development and its following migration. The presence of pollutants in the aquatic environment depends on a source, their ability to bioaccumulate, as well as to degrade in the processes of biological and abiotic purification. High-resolution mass spectrometry in combination with gas or liquid chromatography can be recommended for detection of new pollutants. Due to high mass measurement accuracy and high specificity, this method is able to effectively identify pollutants even in the complex fish matrix. When conducting non-targeted and targeted screening with highly sensitive full scanning, it is advisable to use high-resolution mass analyzers (TOF, Q-TOF, Q-Orbitrap), which allow determining a number of new compounds. A promising direction in the complex assessment of the impact of pollutants on salmon fish species and the identification of indicators characterizing this impact is metabolomics. It is based on the study of low-molecular organic compounds — metabolites, both intermediate and final metabolic products in body fluids and tissues. Metabolomic profiling allows identifying important markers of the state of a water body under the influence of pollutants, which is necessary for the development of comprehensive regulations and guidelines for the effective handling of these pollutants.

### 1. Введение

В последние десятилетия появление новых загрязняющих веществ (НЗВ) антропогенного или природного происхождения в водных экосистемах стало глобальной экологической проблемой, вызывающей серьезные опасения в связи с их потенциальным неблагоприятным

воздействием на водные объекты [1,2]. Эти загрязняющие вещества не включены в программы мониторинга или надзорной деятельности и, следовательно, не регламентируются природоохранным законодательством. Однако предполагается, что эти загрязняющие вещества оказывают токсическое воздействие на экосистемы или здоровье человека.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Абрамова, Л. С., Козин, А. В., Гусева, Е. С. (2024). Новые загрязняющие вещества: риски при миграции лососевых видов рыб. Обзор. *Пищевые системы*, 7(3), 384–393. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-384-393>

FOR CITATION: Abramova, L. S., Kozin, A. V., Guseva, E. S. (2024). Emerging pollutants: Risks in salmon fish migration. A review. *Food Systems*, 7(3), 384–393. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-384-393>

НЗВ можно охарактеризовать как химические вещества, полученные в результате научно-технологического прогресса и обнаруженные в окружающей среде. Их влияние на здоровье человека и природу изучено не до конца, однако известно, что они представляют потенциальную или реальную угрозу. НЗВ характеризуются обширным распространением, неконтролируемым содержанием в окружающей среде и широким спектром потенциальных угроз [3]. Помимо индивидуального воздействия, важно учитывать потенциальный риск неблагоприятных последствий от взаимодействия анализируемых веществ, таких как аддитивные, синергетические и антагонистические эффекты [4,5]. Изучение синергизма между различными загрязнителями требует проведения обширных исследований, поскольку синергетические и антагонистические эффекты зависят от дозы, от вида организма и от окружающей среды. Однако отсутствие учета последствий комбинированного воздействия может привести к недооценке риска [6].

В базе данных PubChem зарегистрировано около 118 млн химических соединений и 320 млн веществ [7], из которых 1,2 млн относятся к категории опасных [8].

Множество химических соединений принято называть химическим пространством. Выделение отдельного пространства тех или иных веществ, особенно опасных для окружающей среды, представляет возможность глубокого изучения связи между структурой и свойствами таких соединений и совершенствования химико-аналитических методов [8,9].

Для борьбы с загрязнением среды проводятся исследования, которые можно разделить на четыре направления: определение видов загрязняющих веществ и их распространение; источники появления и стабильность в окружающей среде; воздействие на окружающую среду и здоровье человека; оценка риска для природы и человека. Этой проблеме уделяется большое внимание во всем мире, о чем свидетельствует число публикаций, которое растет в геометрической прогрессии [10]. По одной только теме «прибрежные воды» количество статей к 2030 году должно увеличиться в два раза [11].

Кроме того, разрабатываются специальные программы мониторинга природной среды, предусматривающие выявление не только известных опасных веществ, но и новых загрязнителей. Примером является инициатива Китайской Народной Республики, в соответствии с которой разработан план действий на 2021–2025 годы. Он предусматривает осуществление контроля над наиболее распространенными и широко используемыми НЗВ, проведение оценки экологического риска для соединений, представляющих реальную угрозу здоровью человека, а также окружающей среде. Это позволит создать модернизированную систему управления новыми загрязнителями и поможет снизить их влияние [12].

НЗВ широко распространены как во внутренних водоемах, так и в океанических водах [13]. Большую опасность НЗВ представляют для таких массовых водных объектов промысла, как лососевые рыбы, которые начинают и завершают свой жизненный путь в пресных водах, а основной прирост своей биомассы получают в морской среде. Так, в 2023 году общий промышленный вылов тихоокеанских лососей на азиатском и американском побережьях составил 1,1 млн тонн. По итогам промысла на первом месте — Россия (55% общего вылова, или 608 тыс. тонн) [14], на втором — США (39%), доля Японии — 5,6%, а Канады и Республики Корея — менее 1% [15].

Изучение влияния новых загрязнителей на лососевые виды рыб имеет большое значение для определения возможной биоаккумуляции, для оценки рисков, для понимания последствий и для принятия своевременных мер по их устранению с целью сохранения этих ценных водных объектов промысла.

Цель обзора заключается в анализе новых загрязняющих веществ, методов их определения, а также в выявлении индикаторов, отражающих влияния среды обитания на состояние лососевых видов рыб в условиях антропогенной нагрузки.

## 2. Материалы и методы

Систематический поиск научной литературы был проведен с использованием поисковых систем PubMed, Scopus, Web of Science и Google Scholar по ключевым фразам «лососевые рыбы/salmon», «новые загрязнители/emerging contaminants (ECs)», «нецелевой анализ/non-targeted analysis», «масс-спектрометрия высокого разрешения/high-resolution spectrometry», «метаболиты/metabolites» с включением операторов «и» и «или». Исследования были сгруппированы по тематическим областям обзора, статьи исключались на основании предварительного анализа названия и аннотации. Предпочтение отдавалось работам, опубликованным не более пяти лет назад

в зарубежных журналах. Также были применены данные из источников научно-технической информации, касающиеся тематики данного обзора.

## 3. Основные источники распространения новых загрязняющих веществ

Биоконцентрация и биоаккумуляция загрязняющих веществ в водной среде, приводя к их накоплению в пищевых цепях, представляют серьезную проблему. Это касается как известных, так и новых загрязнителей, оказывающих негативное влияние не только на водные биоресурсы, но и на здоровье человека [16,17].

Примерами новых загрязнителей могут являться 1,4-диоксан, перфторированные соединения, полибромированные дифениловые эфиры, наночастицы, натуральные и синтетические гормоны, некоторые из которых действуют как химические вещества, нарушающие работу эндокринной системы [18]. К НЗВ относятся также химические вещества, которые ранее использовались, но лишь недавно стали рассматриваться как представляющие опасность, такие как микро- и нанопластик [19], компоненты средств личной гигиены [20] и фармацевтические препараты [21,22,23], включая традиционные эндокринные разрушители (дисрапторы) [24], разные классы пестицидов [25,26,27].

Появление новых загрязнителей — глобальная проблема, обусловленная постоянным развитием технологий производства соединений и модификацией новых заменителей. Этот процесс требует пристального внимания мирового научного сообщества [28,29]. Например, в заливе Сан-Франциско (Калифорния), представляющими опасность являются нонилфенол и этоксилаты нонилфенола, фипронил, перфтороктановый сульфонат и другие перфторалкильные вещества, наличие которых обусловлено широким использованием изделий из пластмасс и синтетических моющих средств. Однако в регионе Великих озер (система пресноводных озер в Северной Америке, на территории США и Канады) полибромдифениловые эфиры, гексабромциклодекан и короткоцепочечные хлорированные парафины стали новыми химическими загрязнителями, представляющими проблему для Канады и Соединенных Штатов. Кроме того, красители [30], эфиры фталевой кислоты [31], карбамазепин, бисфенол А, триклозан, пиретроиды [32] также были названы новыми загрязнителями, которые требуют особого изучения и контроля [33].

Несмотря на то, что многие пестициды, такие как ДДТ и фосфорорганические соединения, считаются устаревшими, некоторые из них, например, фипронил, пиретроиды, неоникотиноиды и родентициды, относятся к группе НЗВ [34].

В связи с ростом числа заболеваний кожи, вызванных солнечным излучением, потребление солнцезащитных средств в мире достигло 10000 тонн в год. Большинство из них содержит сразу несколько химических УФ-фильтров [32,35]. Содержащееся в солнцезащитном креме соединение 4-метилбензилиденкамфора (4-MBC) было обнаружено в пробах окружающей среды на испанском побережье и в швейцарских озерах в концентрации от 2 до 125 нг/л. Оценка риска показала, что 4-MBC представляет собой потенциальную опасность для водных объектов [36]. Другие органические соединения, используемые в качестве ингредиента солнцезащитных кремов и косметики, такие как октокрилен, 3-бензилиден-камфора и бензофенон-3, также были идентифицированы в окружающей среде. Эти вещества представляют опасность для морских экосистем, оказывая стрессовое воздействие на гидробионтов [32].

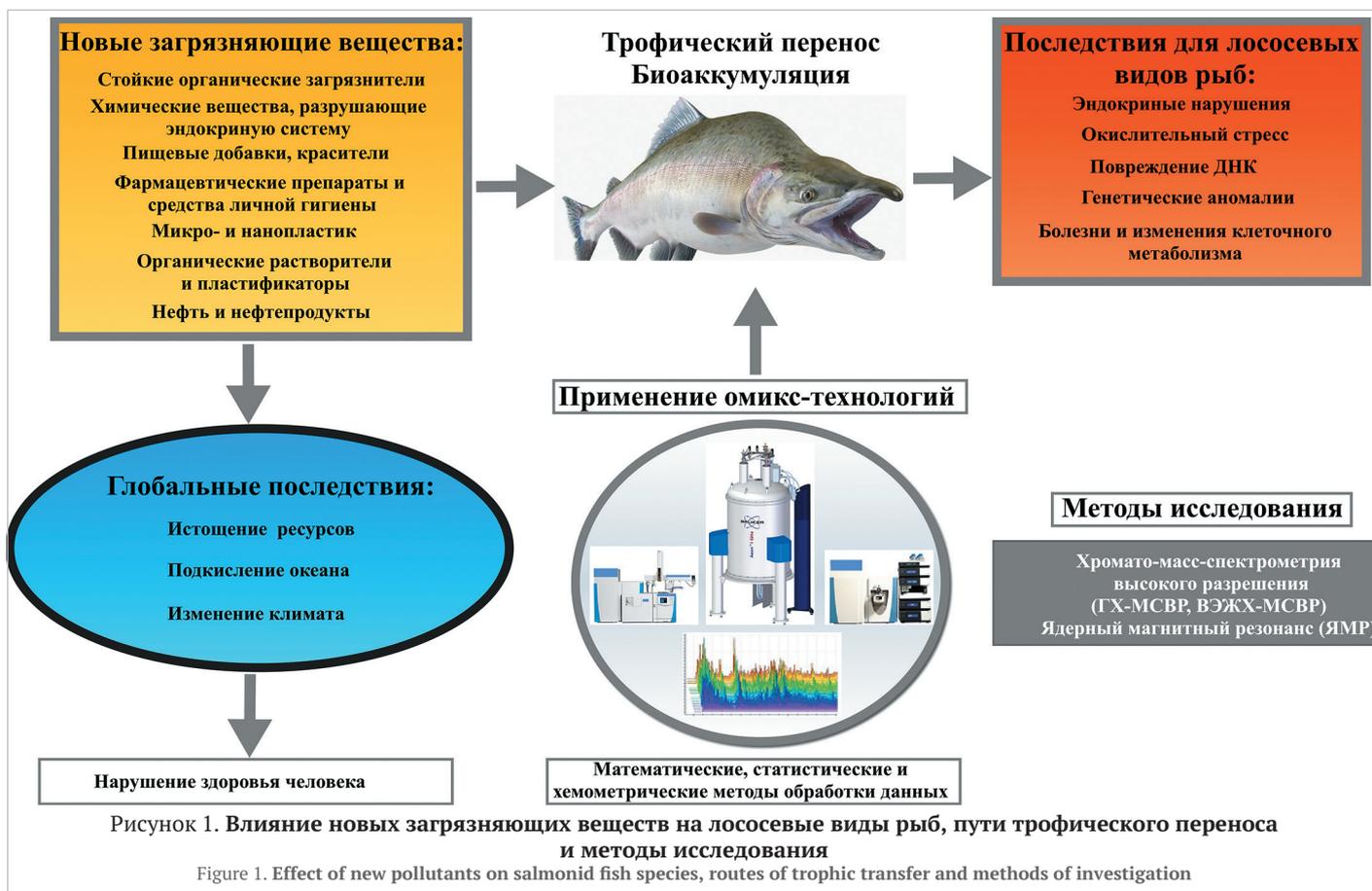
В окружающей среде, особенно в водной, содержится большое количество НЗВ, которые предложено классифицировать по химическому составу и спектру применения на 4 класса (Таблица 1) [37]. В Таблице приведены примеры для каждого класса, однако спектр НЗВ намного шире.

Для лососевых видов рыб проблема воздействия НЗВ, таких как стойкие органические загрязнители, пищевые добавки и красители, фармацевтические препараты и средства личной гигиены, микро- и нанопластик и ряд других соединений, особенно актуальна в связи с особенностями их миграции и развития на начальном периоде существования в пресной речной воде, в которую и попадают указанные выше токсины (Рисунок 1).

Некоторые токсичные вещества могут не только препятствовать миграции, но и отклонять эти виды рыб от маршрута [38]. Выявление связи между биоаккумуляцией НЗВ и их воздействием на живые организмы остается сложной задачей, требующей современных решений. Перспективными являются методы протеомного и метаболомного профилирования, такие как хромато-масс-спектрометрия, ЯМР-спектрометрия и другие омикские технологии, позволяющие анализировать изменения в тканях [39].

Таблица 1. Перечень новых загрязняющих веществ НЗВ, классифицированных в зависимости от их состава и спектра применения  
 Table 1. List of new pollutants classified according to their composition and spectrum of use

№	Класс	Подкласс	Примеры соединений
1	Органические загрязнители	Эндокринные разрушители	17-α -этинилэстрадиол, 17-β-эстрадиол, эстрон, стероидные гормоны, эфиры фталевой кислоты, бисфенолы
		Пищевые и кормовые добавки	2,6-дитрет-бутил-4-метилфенол
		Стойкие органические загрязнители	Бромированные антипирены, полихлорированные бифенилы, полициклические ароматические углеводороды, хлорированные парафины, перфторированные соединения, полибромированные дифениловые эфиры, пер- и полифторалкильные соединения
		Фармацевтические препараты и средства личной гигиены	Дезинфицирующие средства: побочные продукты дезинфекции, хлораты, формальдегид; пентахлорфенол, его соли и эфиры; диклорфенак. Косметические средства: 2-этилгексил 4-метоксисиннамат. Анальгетики и противовоспалительные средства: флумеквин, триметоприм, кеторолак, обезболивающие, запрещенные наркотические препараты, макролидные антибиотики
		Поверхностно-активные вещества	
		Органические растворители/пластификаторы	Гексахлорбутadiен, дехлоран плюс (цис и транс изомеры), дихлорметан, хлороформ, нонилфенолы
2	Неорганические загрязнители	Пестициды и гербициды	Метиокарб, неоникотиноиды, оксадиазон, три-аллат, перхлорат, дикофол
		Цианотоксины	Микроцистин(ы), цилиндропермопсин, анатоксин(ы), сакситоксин(ы)
		Металлы	Стронций, марганец, вольфрам, литий
		Радионуклиды и радиоактивные отходы	H-3, Sr-90, Cs-137, Ts-99, I-129, Pu-239, Pu-240 (233, 234, 235, 238), U, Am-241
3	Биологические загрязнители	Вирусы	
		Белковые загрязнители	
		Генетически модифицированные организмы	
		Различные типы РНК	
		Пептидные комплексы	
4	Другие загрязнители	Микро- и нанопластик	
		Жидкие кристаллические мономеры	
		Устойчивые к воздействию окружающей среды свободные радикалы	
		Вещества неизвестного или изменяющегося состава, сложные продукты реакций или биологические материалы	



### 3.1. Сточные воды — источник распространения новых загрязняющих веществ

Городские стоки обычно загрязняются синтетическими органическими загрязнителями, металлами и неорганическими веществами, возникающими из самых разных источников. Без соответствующей очистки эти химические вещества и связанные с ними продукты трансформации переносятся в поверхностные или грунтовые воды путем преднамеренного сброса, инфильтрации или наземного стока, где они ухудшают качество воды [40]. Многие загрязнители, такие как пестициды, нефтяные углеводороды, тяжелые металлы и другие химические вещества, попадающие из городских стоков, потенциально токсичны в высоких концентрациях и представляют угрозу для окружающей среды. Очищенные или неочищенные сточные воды (СВ) являются основными источниками загрязнения водных бассейнов средствами личной гигиены человека (СЛГ) и некоторыми фармацевтическими препаратами (ФП). Использование человеком различных лекарственных препаратов приводит к попаданию ФП в виде исходных соединений или метаболитов в сточные воды через мочу и фекалии. СЛГ включают химические ингредиенты в гигиенических и косметических продуктах, таких как мыло, моющие средства, солнцезащитные кремы, увлажняющие средства, помады, краски для волос, дезодоранты, лосьоны, кремы, шампуни, зубные пасты и репелленты [41]. Эти соединения также попадают в окружающую среду с бытовыми или промышленными сточными водами.

Одним из примеров воздействия бытовых или промышленных СВ на лососевые виды рыб является повышенная смертность важных промысловых видов взрослых особей кижуча (*Oncorhynchus kisutch*). Исследования показали, что это явление не связано с типичными показателями химического состава воды (температурой, содержанием кислорода, взвешенными веществами), с болезнями, с состоянием рыб, с воздействием пестицидов, тяжелых металлов или ПАУ. Вероятно, гибель кижуча вызвана неидентифицированными токсикантами [42]. Как правило, мониторинг содержания известных загрязнителей в среде обитания объектов основан на использовании целевых маркеров, эталонных стандартов (например, ПАУ, металлов и пестицидов), часто в сочетании с контролируемым воздействием и пониманием механизмов их действия для корреляции установленных концентраций с биологическим состоянием объекта. Однако такие целевые анализы выявляют только небольшую часть присутствующих загрязнителей и могут быть ограничены отсутствием эталонных стандартов для новых загрязнителей и продуктов биоактивной трансформации.

Проведенные научные исследования показали, что N-(1,3-Диметилбутил)-N'-фенил-п-фенилендиамин (6PPD) был причиной загадочной гибели кижуча (*Oncorhynchus kisutch*), которая наблюдалась в нескольких местах вдоль западного побережья Северной Америки в последние десятилетия [43]. Известно, что 6PPD используется при производстве шин в качестве антиоксиданта и антиозонанта для резиновых изделий. Продукт трансформации этого соединения (его метаболит) — N-1,3-диметилбутил-N'-фенил-п-хинондиамин (6PPDQ) — также обладает стойкостью в окружающей среде и токсическим действием, что подчеркивает острую необходимость постоянного мониторинга и разработки эффективных мер для снижения последствий воздействия как на экосистему, так и на здоровье человека [44]. Это требует проведения исследований для выявления хронических последствий воздействия этих соединений даже в низких концентрациях на водные экосистемы, а также определения возможности биоаккумуляции в пищевой цепи [45]. Идентификация биомаркеров действия 6PPD и 6PPDQ позволит выявить потенциальную опасность 6PPD для рыб и человека, а также целесообразность его использования в производстве шин. Проблема стоит очень остро, так как новые исследования установили, что городские стоки с проезжей части являлись причиной смерти молоди кижуча, симы и чавычи [46,47].

Хорошо известно, что установки по очистке сточных вод выбрасывают сложные смеси химикатов в водную среду, однако токсичность этих смесей до сих пор плохо изучена. Резкое сокращение численности чавычи (*Oncorhynchus tshawytscha*) в регионе Пьюджет-Саунд и отсутствие признаков восстановления, несмотря на принятые на региональном и федеральном уровне меры, стали причиной проведения исследований [48]. Сделано предположение, что одной из причин снижения запасов молоди чавычи является химическое загрязнение СВ во время их миграции по речным коридорам и проживания в устьях рек. Для подтверждения данного предположения исследовано влияние разбавленных СВ от 0,1% до 20% на состояние молоди чавычи при десятидневном воз-

действии. По окончании исследования были измерены показатели, связанные с эндокринными нарушениями, функцией мозга, осморегуляцией, стрессом и обменом веществ. Воздействие СВ в значительной степени индуцировало вителлогенез, что указывало на нарушение эндокринной системы у рыб. Установлено значительное снижение уровня глюкозы в плазме, что являлось признаком стресса и изменения активности Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>-АТФазы мозга — фермента (АФ), необходимого для передачи сигналов нейронами. Показано, что на метаболизм повлияло изменение общего белка, холестерина и альбумина в плазме, а также резкое снижение содержания липидов во всем организме и значительное увеличение видимых аномалий печени. Проведено сравнение концентрации загрязняющих веществ в исследуемых образцах воды с показателями токсичности основных веществ, которые, как известно, индуцируют вителлогенез или ингибируют АФ головного мозга. Концентрации большинства загрязняющих веществ в исследуемых водах были на несколько порядков ниже установленного предельно допустимого уровня [48,49]. Исключением были эстрогенные гормоны, высокая концентрация которых в исследуемых сточных водах, как было установлено ранее, приводит к образованию вителлогенина. На основании анализа данных сделан вывод, что загрязняющие вещества, определенные в этом исследовании, не могли привести к ингибированию АФ головного мозга. Однако смеси СВ содержали большое количество и необнаруженных соединений, которые, вероятно, действуют вместе, представляя угрозу для молоди чавычи. Это исследование подчеркивает необходимость улучшения очистки сточных вод для сохранения здоровья водной среды и для смягчения воздействия на виды, находящиеся под угрозой исчезновения, такие как чавыча из Пьюджет-Саунда.

### 3.2. Стойкие органические загрязнители

Глобальное загрязнение окружающей среды, в особенности воздействие пер- и полифторированных веществ (ПФВ) на рыб, вызывает все большую обеспокоенность среди научного сообщества [50,51]. Хорошо известно, что перфторированные алкилсульфаты (ПФАС) повсеместно распространены в окружающей среде, очень стабильны и, следовательно, способны к биоаккумуляции [52]. Исследованиями подтверждено их широкое распространение и неблагоприятное воздействие на здоровье человека, включая дислипидемию и иммунотоксичность [53]. Агентство по охране окружающей среды США регламентировало очень низкие (< 4 нг/л) уровни некоторых ПФВ в питьевой воде [54]. В 2020 году Европейское агентство по безопасности продуктов питания установило еженедельный допустимый предел потребления критически важных ПФАС из пищевых продуктов, включая рыбу, в размере 4,4 нг/кг массы тела человека [55].

Стойкими органическими загрязнителями являются бромированные антипирены (БА) — большая группа химических соединений, применяемых в различных бытовых и коммерческих веществах для предотвращения распространения огня. Несмотря на мировой запрет на использование наиболее распространенных бромированных антипиренов (БА), разработка и внедрение новых соединений продолжается, а информация об их воздействии на окружающую среду остается ограниченной. Проведено исследование по содержанию двух новых БА: 1,2-бис(2,4,6-трибромфенокси)этана (БАЭ) и 2-этилгексил-2,3,4,5-тетрабромбензоата (БАБ) в молоди радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) [56]. Оба соединения были обнаружены в мышечной ткани рыб, что указывает на накопление и метаболизм этих соединений. Анализ транскрипции генов печени с использованием секвенирования РНК показал, что хроническое 28-дневное поступление БАБ с пищей у форели подавляло один единственный ген, связанный с эндокринно-опосредованными процессами, тогда как БАЭ влиял на транскрипцию 33 генов, включая гены, участвующие в иммунном ответе, в репродукции и в окислительном стрессе. Дополнительный анализ с использованием количественной ПЦР (qRT-PCR) после 48-часового и 28-дневного воздействия подтвердил влияние БАЭ на гены, связанные с иммунной системой, печенью и головными почками. Однако активность лизоцимов, измеренная на уровне белка, не отражала транскриптомные результаты. Полученные закономерности свидетельствовали о влиянии на транскрипцию иммунозависимых генов у рыб, подвергшихся воздействию БАЭ, а также о возможном окислительном стрессе и эндокринных нарушениях.

Проведены исследования содержания короткоцепочных хлорированных парафинов (КЦХП, C<sub>10</sub>-C<sub>13</sub>) и среднецепочных хлорированных парафинов (СЦХП, C<sub>14</sub>-C<sub>17</sub>) в 122 образцах выращенного

на фермах лосося (*Salmo salar*) и в 11 образцах дикого лосося (*Oncorhynchus gorbuscha* и *Oncorhynchus keta*), которые были приобретены в торговой сети в Баден-Вюртемберге (Южная Германия) в рамках официальной программы контроля пищевых продуктов [57]. Полученные данные свидетельствовали о значительном количестве КЦХП в образцах рыбы, а также о накоплении СЦХП. В связи с тем, что Стокгольмская конвенция регулирует использование только КЦХП [58], для оценки рисков необходимы токсикологические исследования как КЦХП, так и СЦХП. Учитывая отсутствие данных о канцерогенности КЦХП и СЦХП, а также их доказанную способность к биоаккумуляции, требуется тщательная оценка рисков для человека. Определение максимально допустимых уровней этих веществ критически важно для обеспечения принципа превентивной защиты потребителей.

### 3.3. Нефтяные выбросы

Разлив нефти, связанный с разведкой и добычей нефти, представляет собой потенциальную угрозу морским организмам во всем мире. Было установлено, что водные биоресурсы на ранних стадиях развития, особенно эмбрионы и личинки, наиболее уязвимы к воздействию нефтяных загрязнений. Это связано с их обитанием в эпипелагиали — поверхностном слое воды, который подвержен наибольшему воздействию при разливах нефти [59]. После разлива нефти небольшая фракция нефти механически перемешивается в воде по всей толще под действием волн и течений, образуя водосодержащую фракцию (ВФ) нефти (т. е. физически диспергированную нефть) [60].

Для лососевых видов рыб установлено, что чувствительность эмбрионов к водорастворимой фракции нефти в пресной воде увеличивалась после их вылупления, оставаясь очень высокой до полного рассасывания желтка и перехода на активное питание. Показана максимальная токсичность сырой нефти для горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha*) и кижуча (*Oncorhynchus kisutch*) в период вылупления, в то время как предличинки оказались умеренно устойчивы, а эмбрионы — наиболее устойчивы. Различия в устойчивости объясняются наличием защитных оболочек у икры, но зависят от состава водорастворимой фракции нефти. Минимальные токсичные концентрации нефтеуглеводородов (НУ) в зависимости от химических свойств для разных видов животных составляют 0,0004–0,002 мг/л водорастворимой фракции нефти, что значительно ниже утвержденной в Российской Федерации предельно допустимой концентрации НУ в растворенном и эмульгированном состоянии для вод рыбохозяйственных водоемов [61].

Сырая нефть представляет собой сложную смесь углеводородных и неуглеводородных соединений, однако полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) считаются особенно токсичными компонентами [62,63]. Было показано, что воздействие ПАУ, полученного из сырой нефти, вызывает нарушение метаболических функций и способности плавать, а также морфологические дефекты, кардиотоксичность, замедление роста и повышенную смертность на ранних стадиях жизни морских рыб и беспозвоночных [64].

Воздействия сырой нефти на сердечную деятельность у рыб хорошо изучены на ранних стадиях жизни и включают брадикардию, аритмии, отеки перикарда, снижение ударного объема и снижение сердечной сократимости, которые оказывают влияние на воспроизводство [65,66]. Установлено, что бенз(α)пирен способен индуцировать аномальное развитие глаз у радужной форели. Опытным путем доказано, что за счет оседания рыба может обнаруживать сырую нефть и избегать ее путем изменения пути движения. С использованием электроольфактограммы выявлена реакция радужной форели на воду, загрязненную нефтеносными песками [67].

За последнее десятилетие резко возросло количество исследований, посвященных характеристике токсичности сырой нефти. В частности, основное внимание уделялось водорастворимым соединениям, присутствующим после разлива нефти, которые известны как водорастворимая фракция или водосодержащая фракция, так как рыба на ранней стадии жизни реагирует на растворенную фракцию [68], а не на капли нефти. Многочисленные исследования, проведенные на рыбах, показали, что полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) являются ключевым фактором токсического воздействия водорастворимой фракции нефти на эти организмы.

Согласно Регламенту Комиссии (ЕС) 2023/915 [69] от 25 апреля 2023 года о максимальных уровнях некоторых загрязняющих веществ в пищевых продуктах, для всей копченой рыбной продукции нормируется сумма ПАУ: бенз(α)пирен, бенз(α)антрацен, бензо(б)

флуорантен и хризен, в то время как согласно действующим нормативным документам в Российской Федерации регламентируется только один из представителей ПАУ — бенз(α)пирен для копченой рыбной продукции.

### 3.4. Микропластик

Пластиковое загрязнение — глобальная проблема для Мирового океана. Около 300 миллионов тонн пластикового мусора плавает на поверхности, скапливается на дне и побережьях, от полюсов до экватора. Ожидается, что к 2050 году производство пластика удвоится или, возможно, даже увеличится в четыре раза. В некоторых местах численность пластика в морских экосистемах уже превышает численность зоопланктона, поэтому неудивительно, что внимание к микропластику (МП) в научных кругах и обществе расширяется [70,71]. Термин МП был впервые введен в 2004 году в контексте небольших пластиковых фрагментов. В настоящее время пластик с гранулометрическим составом 1–5 мм определяют как МП. Благодаря небольшому размеру МП попадает в водные системы разными путями, в том числе через дождь, ветер и сточные воды. Малый размер таких пластиков также представляет опасность для окружающей среды, поскольку частицы МП могут накапливаться водными организмами и в худшем случае могут привести к их голоданию [72].

Лабораторные эксперименты показали, что МП может поедаться различными морскими организмами, включая полихет, ракообразных, двусторчатых моллюсков и иглокожих. Благодаря своим гидрофобным свойствам микропластик также может адсорбировать некоторые классы органических загрязнителей, которые затем передаются в организмы и попадают в морские пищевые цепи [73]. Последствия действия микропластика сказываются на пищевой активности, на дыхательной функции, на репродуктивности, а также на модулировании ряда молекулярных и клеточных путей [72]. Многочисленные риски микропластика для водных ресурсов привели к тому, что эта проблема была включена в некоторые международные законы и проекты по защите морской среды, такие как Рамочная директива ЕС по морской стратегии [74] и программа Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA) [75].

Получение глубоких знаний о наличии и характеристике микропластика в морских пищевых цепях стала приоритетом в исследовании и фундаментальным шагом на пути к комплексной оценке экологических рисков.

С целью изучения содержания микропластика в организме рыб было проведено исследование с использованием трех методов анализа [76]. Ученые сравнили мышечную ткань и печень атлантического лосося, выращенного в условиях аквакультуры и выловленного в естественной среде, а также дикой горной форели. Инфракрасная микроспектроскопия с преобразованием Фурье (μFTIR)

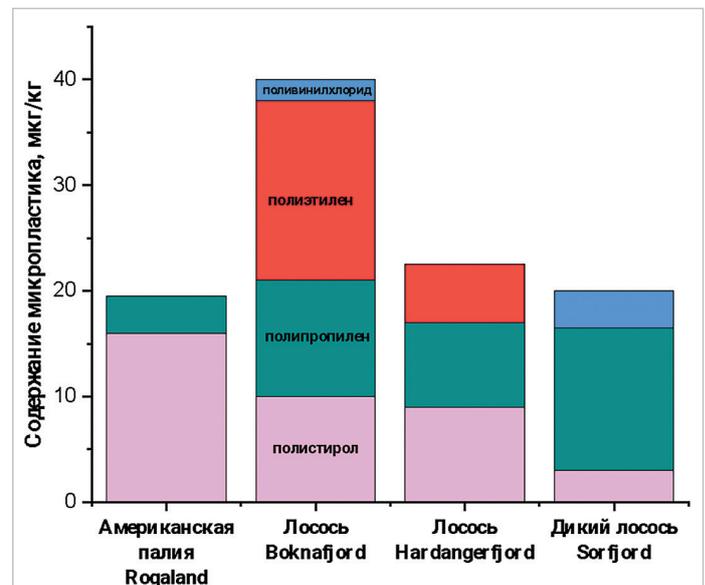


Рисунок 2. Содержание МП в мышечной ткани лососевых видов рыб из различных регионов добычи (Норвегия) [76]  
Figure 2. Content of microplastics in muscle tissue of salmonid fish species from different locations of collection (Norway) [76]

и пиролизическая газовая хромато-масс-спектрометрия (ру-GCMS) были успешно применены не только для обнаружения, но и для количественного определения МП в тканях рыб. Масс-спектрометрия высокого разрешения позволила количественно определить фталаты и фосфорорганические антипирены в изучаемых объектах. Найдена хорошая количественная корреляция содержания пластика в исследуемых объектах с помощью  $\mu$ FTIR и ру-GCMS. Кроме того, впервые изучено распределение МП по размеру в объектах аквакультуры и в диких лососевых рыбах.

МП в диапазоне размеров от 10 до > 200 мкм был обнаружен как в печени, так и в мышечной ткани у всех изученных объектов, при этом чаще всего встречался МП размером менее 50 мкм. При исследовании большое внимание уделялось исключению возможности внешнего загрязнения образцов микропластиком. Установлено, что статистической разницы в измеренных общих концентрациях МП в мышцах и печени не наблюдалось. С использованием  $\mu$ FTIR идентифицировано 26 видов полимеров, при этом каучук не был обнаружен ни в одном образце, а поликарбонат был найден только в одном образце мышечной ткани. Как видно из Рисунка 2, в мышечной ткани лососевых видов рыб содержатся в разных количествах следующие виды МП: полиэтилен, полипропилен, полистирол и поливинилхлорид.

Исследования выявили наличие разнообразных видов микропластика как в мышечной ткани и печени выращенного в норвежских фюльдах лосося, так и у дикой рыбы. Для определения точного содержания микропластика в тканях лососевых рыб, влияния среды обитания на его накопление, а также рисков для здоровья рыб и человека, необходимы дальнейшие комплексные исследования [77].

#### 4. Методы определения не регламентированных загрязнителей

Масс-спектрометрия в сочетании с хроматографическими методами разделения играет ключевую роль в определении приоритетных загрязняющих веществ в пищевой рыбной продукции, в том числе не регламентированных. Целевой анализ проводят по утвержденным методикам, используя разные варианты хроматографического анализа и масс-спектрометрии. В квадрупольном масс-спектрометре (Q) в основном используется режим мониторинга выбранных ионов (SIM), при котором масс-анализатор настраивается на регистрацию только одного или нескольких ионов с заранее выбранным значением  $m/z$  [78,79]. Tandemный вариант масс-спектрометрического анализа (QqQ) проводится в режиме мониторинга множественных реакций (multiple reaction monitoring, MRM), выбираются и сканируются выбранные ионы-предшественники на первом квадруполе (Q), в то время третий квадруполь (Q) избирательно настроен на пропускание только специфических его фрагментов — ион-продуктов, которые образовались во время фрагментации во втором квадруполе (q). Данный режим характеризуется большой чувствительностью, селективностью, широким динамическим диапазоном и является наиболее распространенным в рутинном количественном анализе рыбы и рыбной продукции, а также широко используется для обнаружения многих загрязняющих веществ [80,81]. Однако из-за недостаточной скорости сканирования и низкой чувствительности в режиме полного сканирования QqQ-MS/MS не может удовлетворить требованиям к быстродействию и большому диапазону для высокопроизводительного нецелевого скрининга.

Для идентификации веществ, имеющих широкий спектр физико-химических характеристик (молекулярная масса, летучесть, гидрофобность и др.), используются разные варианты хроматографического разделения, ионизации, а также масс-спектрометрического детектирования, что затрудняет разработку единого подхода для их определения.

Согласно методологии, представленной в работе [82], для определения наличия 212 химических веществ из приоритетного списка в соответствии регламентом Европейского союза No 1907/2006 [83], регулирующим производство и оборот всех химических веществ, которые могут представлять опасность для здоровья человека при употреблении пищевых продуктов (в том числе в сельди, лосося, форели), аналиты были разделены на две группы согласно логарифмическому значению коэффициента распределения н-октанол-вода  $K_{ow}$ . Химические вещества со значениями  $\log K_{ow} > 0,4$  извлекали методом экстракции QuEChERS (быстрым, простым, дешевым, эффективным, надежным и безопасным) и определяли методом ВЭЖХ или газовой хроматографией. Масс-селективное обнаружение и идентификацию осуществляли с использованием тройного квадрупольного

масс-анализатора (QqQ). Для химических веществ со значениями  $\log K_{ow} \leq 0,4$  разделение достигалось с помощью жидкостной хроматографии с гидрофильным взаимодействием (HILIC) или обращенно-фазовой жидкостной хроматографией. Масс-селективное обнаружение и идентификация осуществлялись QqQ масс-анализатором с ионизацией электрораспылением (ESI+ или ESI-).

Сложный химический состав рыбных матриц требует применения высокоэффективных аналитических методов. Высокая разрешающая способность хроматографической системы в сочетании с непревзойденной точностью и специфичностью масс-спектрометрии высокого разрешения (МСВР) позволяет эффективно преодолевать сложности, связанные с влиянием разнообразных компонентов.

В руководящих документах к целевому анализу предъявляют определенные критерии надежности идентификации, связанные как с хроматографической, так и с масс-спектрометрической составляющей различных вариантов хромато-масс-спектрометрической системы [84]. Популярность нецелевого анализа среди ученых возрастает, однако возникает проблема оценки его эффективности. Определить долю обнаруженных и корректно идентифицированных соединений непросто, поскольку состав исследуемых образцов зачастую неизвестен [85]. Хромато-масс-спектрометр высокого разрешения во всем диапазоне масс в режиме полного сканирования позволяет с высокой точностью определять массы ионов ( $\pm 0,001$  Да) и обладает высоким разрешением по массе ( $\geq 20000$ ), что обеспечивает превосходную специфичность и селективность [86].

МСВР в сочетании с хроматографией обладает большой гибкостью при сборе и анализе данных для целевого анализа известных загрязняющих веществ и позволяет провести более широкий отбор потенциально подозрительных соединений или полный нецелевой анализ, при котором не делается никаких предварительных предположений относительно того, какие именно токсичные компоненты в рыбной матрице могут присутствовать. Использование системы МСВР позволило обнаружить не регламентированные загрязнители в рыбных объектах и провести более глубокое исследование взаимосвязи между окружающей средой и их безопасностью [87].

Кроме того, скрининг на приборе МСВР дает возможность проводить ретроспективный анализ данных на основе апостериорного анализа масс-спектра, полученного во время хроматографического анализа, что позволяет осуществлять глубокое нецелевое исследование загрязняющих веществ, включая гомологи соединений и их метаболитов.

Способность МСВР собирать огромные объемы данных для любого конкретного образца является ее сильной стороной, но также требует высокой квалификации оператора. Постоянное совершенствование методов обработки и оценки данных МСВР, особенно для нецелевого анализа, будет иметь решающее значение для полного использования преимуществ этого мощного аналитического метода.

Для проведения нецелевого и целевого скрининга с высокочувствительным полным сканированием используются квадруполь-времяпролетные масс-анализаторы высокого разрешения (Q-TOF) или орбитальная ионная ловушка (Q-Orbitrap) в tandemном исполнении. В Таблице 2 приведены примеры выявления не регламентированных загрязнителей в лососевых видах рыб с использованием современной приборной базы.

В европейской практике широко распространена бальная система оценки надежности результатов. В 2021 году Европейская комиссия опубликовала исполнительный регламент EU2021/808 от 22 марта 2021 года о применении аналитических методов для определения остатков ветеринарных препаратов, используемых у сельскохозяйственных животных, об интерпретации результатов, а также о методах, которые будут использоваться для отбора проб [90].

Запрещенный препарат считается идентифицированным, если его время удерживания находится в приемлемых пределах (т. е.  $\pm 0,5\%$  для газовой хроматографии и  $\pm 1\%$  для жидкостной хроматографии и метод его детектирования для неразрешенных или запрещенных веществ оценен на 5 баллов). Чтобы соответствовать требованию, к идентификационным баллам можно добавлять баллы, полученные с помощью различных методов, например, один балл может быть результатом хроматографического разделения. В Таблице 3 перечислены баллы идентификации для масс-спектрометрического метода анализа.

Таблица 2. Не регламентированные загрязнители, идентифицированные в ходе целевого и нецелевого скрининга масс-спектрометрией высокого разрешения в лососевых видах рыб

Table 2. Non-regulated pollutants identified in the course of targeted and non-targeted screening by high-resolution mass spectrometry in salmonid fish species

Идентифицируемые ненормируемые загрязнители	Объект анализа	Пробоподготовка* Метод определения.	Ссылка
Броминдол, диброманизол, триброманизол, хлороксиленон, пентахлорстирол, тетрахлордиметоксибензол, дихлорфенол, дихлорфенол сульфат, трихлорфенол	Лосось Форель	ВЭЖХ- (ESI+/-) MСBP ГХ-(EI)-MСBP Экстракция по QuEChERS, QuPPe	[82]
Бис-(2-Этилгексил)фталат, фосфорорганические ароматические соединения, хлорированные n-алканы	Лосось Форель	ГХ-MСBP (Orbitrap) Экстракция органическими растворителями.	[76]
Хлорированные парафины различной структуры и их гомологи, бромированные антипирены, гексабромциклододекан	Лосось Горбуша Кета	ГХ-(ECNI)- MСBP (Orbitrap) Экстракция: ЖЖЭ дихлорметан/n-гексан Очистка: ТФЭ (кремнезем, импрегнированный, серной кислотой, Флорисил PR)	[57]
Парабены и метаболиты, 4-гидроксибензойная кислота	Лосось Кижуч Нерка Кумжа	ВЭЖХ-(HESI)- MСBP (Orbitrap) Экстракция ацетонитрилом с 0,1–1% муравьиной кислотой, обезжиривание n-гексаном; центрифугирование, упаривание	[88]
Продукты термической трансформации малахитового зеленого и лейкомалахитового зеленого	Голец	УВЭЖХ-MС-ВП, (UHPLC-QTOF-ESI-MS) Экстракция по QuEChERS	[89]
Пестициды и промышленные химикаты: этопрофос, прометон, N, N-диэтил-m-толуамид, кофеин, котинин, 5-метил-1H-бензотриазол, ацетанилид	Кижуч	УВЭЖХ-MС-ВП, (UHPLC-QTOF-ESI-MS) Экстракция: селективная жидкостная экстракция под давлением (SPLE) с метанолом и ацетонитрилом Очистка: ТФЭ (флоризил, алюминий и силикагель)	[42]

Примечание: QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, and Safe) — Быстро, Просто, Дешево, Эффективно, Надежно и Безопасно; QuPPe (Method Quick Polar Pesticides Method) — быстрый метод анализа полярных пестицидов; ECNI (Electron-Capture Negative Ion Mass Spectrometry) — масс-спектрометрия отрицательных ионов с захватом электрона. EI (Electron Ionization) — электронная ионизация, ESI (Electrospray Ionization) — ионизация электрораспылением), QTOF (quadrupole time-of-flight) — тандемное квадруполь-времяпролетное масс-спектрометрическое детектирование.

Таблица 3. Идентификационные баллы для масс-спектрометрических методов анализа

Table 3. Identification scores for mass spectrometry methods of analysis

Наименование метода	Идентификационные баллы
Разделение (хроматография, капиллярный электрофорез)	1
Ион МС низкого разрешения	1
Выбор иона-предшественника в диапазоне масс < ± 0,5 Да	1 (непрямое)
Ион-продукт МС <sup>n</sup> низкого разрешения	1,5
Ион МС высокого разрешения	1,5
Ион-продукт в МС <sup>n</sup> высокого разрешения	2,5

## 5. Оценка влияния среды обитания на водные биологические ресурсы

Поскольку антропогенные загрязнители повсеместно распространены в водной среде, важно всесторонне оценить их воздействие на обитающие организмы. Традиционное тестирование токсичности основано на наблюдаемых конечных точках в качестве индикаторов, включая смертность, развитие и размножение. Этим индикаторам часто не хватает чувствительности, необходимой для обнаружения изменений концентраций в окружающей среде. Для комплексной оценки влияния загрязнителей на водные ресурсы все большее внимание уделяется метаболомике, так как основное направление исследований посвящено изучению низкомолекулярных органических соединений — метаболитов, как промежуточных, так и конечных продуктов обмена, в жидкостях и тканях организма [91]. Метаболиты представляют собой наиболее точное отражение фенотипа организма, и систематическое их изучение (получение метаболомического профиля) позволяет лучше понять биохимические процессы и подробно дифференцировать стадии соответствующих химических превращений. Метаболомика позволяет отслеживать возмущения на молекулярном уровне и оценивать токсический механизм действия при сублетальных концентрациях модельных загрязнителей.

С использованием метаболомики исследуются глобальные метаболомические изменения в организме, связанные с химическими, био-

логическими, физиологическими или патологическими процессами, и выявляются индикаторы (метаболиты), отражающие состояние изучаемого объекта под действием различных факторов. Эти метаболомические изменения измеряются с помощью различных аналитических платформ.

Наиболее часто используемые инструментальные методы в метаболомных анализах — ЯМР-спектроскопия на различных ядрах (<sup>1</sup>H, <sup>13</sup>C, <sup>31</sup>P и пр.), а также масс-спектрометрия (МС) низкого и высокого разрешения, сопряженная с газовой и высокоэффективной жидкостной хроматографией [92,93]. Каждая аналитическая платформа предоставляет комплементарную информацию со своими преимуществами и недостатками.

ЯМР менее чувствителен, чем МС и, следовательно, обнаруживает относительно небольшое количество метаболитов. Однако ЯМР обладает многочисленными уникальными характеристиками, включая высокую воспроизводимость и неразрушающий характер, способность окончательно идентифицировать неизвестные метаболиты и получать абсолютные концентрации всех обнаруженных метаболитов, иногда даже без внутреннего стандарта. Эти характеристики нивелируют относительно низкую чувствительность и разрешение ЯМР в метаболомных приложениях. Поскольку биологические смеси очень сложны, растет потребность в новых методах, позволяющих улучшить предел обнаружения, надежно идентифицировать неизвестные метаболиты и обеспечить более точный количественный анализ. В этом отношении ЯМР широко применяется для исследований метаболомических потоков и визуализации, идеально подходит для изучения живых клеток, тканей и органов. ЯМР стал предпочтительным способом измерения классов липопротеинов и холестерина в плазме.

Технологические и методологические достижения на сегодняшний день помогли улучшить разрешение и чувствительность метода ЯМР, а также обнаружение большего количества сигналов метаболитов. Усилия, направленные на измерение сигналов неизвестных метаболитов, привели к идентификации и количественному определению расширенного пула метаболитов, включая лабильные метаболиты, такие как клеточные окислительно-восстановительные коферменты, энергетические коферменты и антиоксиданты.

Хотя методы жидкостной хромато-масс-спектрометрии становятся все более популярными в области метаболомики (на сегодняшний день на их долю приходится более 70% опубликованных

метаболических исследований), методы ЯМР в метаболических исследованиях по-прежнему имеют значительные преимущества [94].

Для решения сложных экотоксикологических проблем в последнее время все больше используется метаболический подход к исследованию окружающей среды и объектов. Этот многообещающий подход имеет высокий потенциал для выяснения механизмов действия загрязнителей (при оценке опасности и разработке индикаторов при экологическом биомониторинге). Целевой метаболический анализ был проведен при изучении молоди чавычи, которая в течение 10 дней содержалась в разбавленных сточных водах крупной городской очистной станции (20%, 5,3%, 1,4%, 0,4% и 0,1%) и в чистой воде (контроль) [48]. С помощью жидкостной хромато-масс-спектрометрии в образцах печени рыб были обнаружены 185 эндогенных метаболитов. Метаболическое профилирование показало, что воздействие сточных вод изменило многочисленные эндогенные биохимические пути, важные для выработки и использования энергии, липидного обмена и биосинтеза, метаболизма аминокислот и окислительного стресса. Кроме того, анализ пути действия лекарств показал, что некоторые фармацевтические препараты являются потенциальными агентами, влияющими на метаболиты, такие как антибиотики, антидепрессанты, антигистаминные препараты, анальгетики и статины, даже при самых низких протестированных концентрациях в сточных водах (0,1% и 0,4%). Однако из-за отсутствия аналитических методов определения наиболее часто назначаемых лекарств в США только 25% из 300 было включено в целевой анализ химических веществ в сточных водах. Это подчеркивает необходимость дополнительного нецелевого анализа, чтобы более полно охарактеризовать химический состав сточных вод. Необходимы дополнительные исследования для дальнейшей оценки хронического воздействия загрязнителей в сточных водах на физиологические функции у рыб,

такие как нарушение роста, иммунная дисфункция, нарушение воспроизводства и изменение поведения.

## 6. Заключение

Из аналитического обзора следует, что проблема воздействия фармацевтических и ветеринарных препаратов, компонентов средств личной гигиены, микропластика, пер- и полифторированных веществ, перфторированных алкилсульфатов, бромированных антипиренов, хлорированных н-алканов, нефти и целого ряда других соединений на лососевые виды рыб особенно актуальна в связи с особенностями их миграции и развития на начальном периоде существования в пресной речной воде, в которую и попадают указанные выше токсиканты.

Для определения НЗВ может быть рекомендована масс-спектрометрия высокого разрешения в сочетании с газовыми или жидкостными хроматографами, которая благодаря высокой точности измерения масс и непревзойденной специфичности способна преодолеть сложности, связанные с влиянием разнообразных компонентов, присутствующих в рыбной матрице. При проведении нецелевого и целевого скрининга с высокочувствительным полным сканированием целесообразно использовать масс-анализаторы высокого разрешения (TOF, Q-TOF, Q-Orbitrap), позволяющие определять целый ряд новых соединений.

Для комплексной оценки влияния загрязнителей и выявления индикаторов, отражающих влияние среды обитания на лососевые виды рыб, перспективным подходом является метаболический подход. Он основан на изучении низкомолекулярных органических соединений — метаболитов, как промежуточных, так и конечных продуктов обмена, в жидкостях и тканях организма.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Câmara, J. S., Montesdeoca-Esponda, S., Freitas, J., Guedes-Alonso, R., Sosa-Ferrera, Z., Perestrelo, R. (2021). Emerging contaminants in seafront zones. Environmental impact and analytical approaches. *Separations*, 8(7), Article 95. <https://doi.org/10.3390/separations8070095>
- Sultan, M. B., Anik, A. H., Rahman, M. M. (2024). Emerging contaminants and their potential impacts on estuarine ecosystems: Are we aware of it? *Marine Pollution Bulletin*, 199, Article 115982. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115982>
- Mofijur, M., Hasan, M. M., Ahmed, S. F., Djavanroodi, F., Fattah, I. M. R., Silitonga, A. S. et al. (2024). Advances in identifying and managing emerging contaminants in aquatic ecosystems: Analytical approaches, toxicity assessment, transformation pathways, environmental fate, and remediation strategies. *Environmental Pollution*, 341, Article 122889. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122889>
- Martin, O., Scholze, M., Ermler, S., McPhie, J., Bopp, S. K., Kienzler, A. et al. (2021). Ten years of research on synergisms and antagonisms in chemical mixtures: A systematic review and quantitative reappraisal of mixture studies. *Environment International*, 146, Article 106206. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106206>
- Martins, I., Soares, J., Neuparth, T., Barreiro, A. F., Xavier, C., Antunes, C. et al. (2022). Prioritizing the effects of emerging contaminants on estuarine production under global warming scenarios. *Toxics*, 10(2), Article 46. <https://doi.org/10.3390/toxics10020046>
- Lagunas-Rangel, F. A., Linnea-Niemi, J. V., Kudlak, B., Williams, M. J., Jönsson, J., Schiöth, H. B. (2022). Role of the synergistic interactions of environmental pollutants in the development of cancer. *GeoHealth*, 6(4), Article e2021GH000552. <https://doi.org/10.1016/10.1029/2021GH000552>
- National Institutes of Health (NIH). Open chemistry database PubChem. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>. Accessed July 2, 2024.
- Журкович, И. К., Мильман, Б. Л. (2023). Химическое пространство опасных веществ. *Химическая безопасность*, 7(2), 23–34. [Zhurkovich, I. K., Milman, B. L. (2023). A chemical space of dangerous substances. *Chemical Safety Science*, 7(2), 23–34. (In Russian)] <https://doi.org/10.25514/CHS.2023.2.25002>
- Khan, N. A., López-Maldonado E. A., Majumder A., Singh S., Varshney, R., López J.R. et al. (2023). A state-of-art-review on emerging contaminants: Environmental chemistry, health effect, and modern treatment methods. *Chemosphere*, 344, Article 140264. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140264>
- Yu, Y., Wang, S., Yu, P., Wang, D., Hu, B., Zheng, P. et al. (2024). A bibliometric analysis of emerging contaminants (ECs) (2001–2021): Evolution of hotspots and research trends. *Science of the Total Environment*, 907, Article 168116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168116>
- Veiga-Del-Baño, J. M., Câmara, M. Á., Oliva, J., Hernández-Cegarra A. T., Andreo-Martínez, P., Motas M. (2023). Mapping of emerging contaminants in coastal waters research: A bibliometric analysis of research output during 1986–2022. *Marine Pollution Bulletin*, 194(PTA), Article 115366. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115366>
- Puri, M., Gandhi, K., Kumar, M. S. (2023). Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations. *Journal of Environmental Management*, 332, Article 117344. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117344>
- Feng, W., Deng, Y., Yang, F., Miao, Q., Ngien, S. K. (2023). Systematic review of contaminants of emerging concern (CECs): Distribution, risks, and implications for water quality and health. *Water*, 15(22), Article 3922. <https://doi.org/10.3390/w15223922>
- Канзепарова, А. Н., Ваизова, И. А., Никифоров, А. И., Беляев, В. А. (2024). Итоги лососевой путины в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне в 2023 г. *Бюллетень № 18 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке*, 18, 3–18. [Kanzeparova, A. N., Vaizova, I. A., Nikiforov, A. I., Belyaev, V. A. (2024). Results of salmon fishery in the Far-Eastern fishery basin in 2023. *Bull. No. 18 Study of Pacific Salmon in the Far East*, 18, 3–18. (In Russian)] [https://doi.org/10.26428/losos\\_bull18-2024-3-18](https://doi.org/10.26428/losos_bull18-2024-3-18)
- ВНИИРО (2024). Делегация России приняла участие в работе международной организации по сохранению анадромных рыб. Электронный ресурс: <http://vniro.ru/ru/novosti/arkhiv-za-2024-god/delegatsiya-rossii-prinyala-uchastie-v-rabote-mezhdunarodnoj-organizatsii-po-sokhraneniuyu-anadromnykh-ryb> Дата доступа 04.07.2024 [VNIRO (2024). Russian delegation took part in the work of the international organization for conservation of anadromous fish. Accessed July 4, 2024 (In Russian)]
- Yu, Y., Wang, Z., Yao, B., Zhou, Y. (2024). Occurrence, bioaccumulation, fate, and risk assessment of emerging pollutants in aquatic environments: A review. *Science of the Total Environment*, 923, Article 171388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171388>
- Falandysz, J., Liu, G., Rutkowska, M. (2024). Analytical progress on emerging pollutants in the environment: An overview of the topics. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 175, Article 117719. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117719>
- Lisco, G., Giagulli, V. A., Iovino, M., Guastamacchia, E., Pergola, G., Triggiani, V. (2022). Endocrine-disrupting chemicals: Introduction to the theme. *Endocrine, Metabolic and Immune Disorders — Drug Targets*, 22(7), 677–685. <https://doi.org/10.2174/1871530321666210413124425>
- Subaramanyam, U., Allimuthu, R. S., Vappu, S., Ramalingam, D., Balan, R., Paital, B., et al. (2023). Effects of microplastics, pesticides and nano-materials on fish health, oxidative stress and antioxidant defense mechanism. *Frontiers in Physiology*, 14, Article 1217666. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1217666>
- Jyoti, D., Sinha, R. (2023). Physiological impact of personal care product constituents on non-target aquatic organisms. *Science of the Total Environment*, 905, Article 167229. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167229>
- Chakraborty, A., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Dutta, S., Chatterjee, S., Banerjee, D. et al. (2023). Pharmaceuticals and personal care products as emerging environmental contaminants: Prevalence, toxicity, and remedial approaches. *ACS Chemical Health and Safety*, 30(6), 362–388. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.3c00071>
- Wydro, U., Wołejko, E., Luarasi, L., Puto, K., Tarasevičienė, Ž., Jabłońska-Trypuć, A. (2024). A review on pharmaceuticals and personal care products residues in the aquatic environment and possibilities for their remediation. *Sustainability*, 16(1), Article 169. <https://doi.org/10.3390/su16010169>
- Hawash, H. B., Moneer, A. A., Galhoum, A. A., Elgarahy, A. M., Mohamed, W. A. A., Samy, M. et al. (2023). Occurrence and spatial distribution of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the aquatic environment, their characteristics, and adopted legislations. *Journal of Water Process Engineering*, 52, Article 105490. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.105490>
- Cunha, S. C., Menezes-Sousa, D., Mello, F. V., Miranda, J. A. T., Fogaca, F. H. S., Alonso, M. B. et al. (2022). Survey on endocrine-disrupting chemicals in seafood: Occurrence and distribution. *Environmental Research*, 210, Article 112886. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112886>

25. Rohani, M. F. (2023). Pesticides toxicity in fish: Histopathological and hemato-biochemical aspects — a review. *Emerging Contaminants*, 9(5), Article 100234. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100234>
26. Ceger, P., Allen D., Blankinship, A., Choksi, N., Daniel, A., Eckel, W. B. et al. (2023). Evaluation of the fish acute toxicity test for pesticide registration. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 139, Article 105340. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2023.105340>
27. Huang, T., Zhao, Y., He, J., Cheng, H., Martyniuk, C. J., (2022). Endocrine disruption by azole fungicides in fish: A review of the evidence. *Science of the Total Environment*, 822, Article 153412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153412>
28. Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, Article 116420. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>
29. Diamond, M. L., Sigmund, G., Bertram, M. G., Ford, A. T., Ågerstrand, M., Carlini, G. et al. (2024). Exploring outputs of the intergovernmental science-policy panel on chemicals, waste, and pollution prevention. *Environmental Science and Technology Letters*, 11(7), 664–672. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00294>
30. IARC. (2022). Gentian violet, leucogentian violet, malachite green, leucomalachite green, and CI Direct Blue 218. IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans, 2022.
31. Liu, Y., Wu, N.-N., Xu, R., Li, Z.-H., Xu, X.-R., Liu, S. (2024). Phthalates released from microplastics can't be ignored: Sources, fate, ecological risks, and human exposure risks. *TRAC Trends in Analytical Chemistry*, 179, Article 117870. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117870>
32. Baldwin, W. S., Bain, L. J., Di Giulio, R., Kullman, S., Rice, C. D., Ringwood, A. H. et al. (2020). 20th Pollutant Responses in Marine Organisms (PRIMO 20): Global issues and fundamental mechanisms caused by pollutant stress in marine and freshwater organisms. *Aquatic Toxicology*, 227, Article 105620. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105620>
33. Yang, W., Bu, Q., Shi, Q., Zhao, R., Huang, H., Yang, L. et al. (2024). Emerging contaminants in the effluent of wastewater should be regulated: Which and to what extent? *Toxics*, 12(5), Article 309. <https://doi.org/10.3390/toxics12050309>
34. Wu, M., Miao, J., Zhang, W., Wang, Q., Sun, C., Wang, L. et al. (2024). Occurrence, distribution, and health risk assessment of pyrethroid and neonicotinoid insecticides in aquatic products of China. *Science of the Total Environment*, 919, Article 170880. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170880>
35. Jesus, A., Sousa, E., Cruz, M., Cidade, H., Lobo, J., Almeida, I. (2022). UV filters: Challenges and prospects. *Pharmaceuticals*, 15(3), Article 263. <https://doi.org/10.3390/ph15030263>
36. Santonocito, M., Salerno, B., Trombini, C., Tonini, F., Pintado-Herrera, M. G., Martínez-Rodríguez, G. et al. (2020). Stress under the sun: Effects of exposure to low concentrations of UV-filter 4-methylbenzylidene camphor (4-MBC) in a marine bivalve filter feeder, the Manila clam *Ruditapes philippinarum*. *Aquatic Toxicology*, 221, Article 105418. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105418>
37. Wang, F., Xiang, L., Sze-Yin Leung, K., Elsner, M., Zhang, Y., Guo, Y. et al. (2024). Emerging contaminants: a One Health perspective. *The Innovation*, 5(4), Article 100612. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100612>
38. Tierney, K. B., Pyle, G. G. (2024). Is salmonid migration at risk from chemical information disruption? *Aquaculture and Fisheries*, 9(3), 378–387. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.05.009>
39. Mohanty, B., Mohanty, S., Mitra, T., Mahanty, A., Ganguly, S., Singh, S. (2019). Omics Technology in Fisheries and Aquaculture. Chapter in a book: *Advances in Fish Research*. Vol.-VII. Narendra Publishing House, Delhi, India. 2019.
40. Ulucan-Altuntas, K., Manav-Demir, N., Ilhan, F., Gelgor, H. B., Huddersman, K., Tiwary, A. et al. (2023). Emerging pollutants removal in full-scale biological treatment plants: a case study. *Journal of Water Process Engineering*, 51, Article 103336. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103336>
41. Hopkins, Z. R., Blaney, L. (2016). An aggregate analysis of personal care products in the environment: Identifying the distribution of environmentally-relevant concentrations. *Environment International*, 92–93, 301–316. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.026>
42. Du, B., Lofton, J. M., Peter, K. T., Gipe, A. D., James, C. A., McIntyre, J. K. et al. (2017). Development of suspect and non-target screening methods for detection of organic contaminants in highway runoff and fish tissue with high-resolution time-of-flight mass spectrometry. *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, 19(9), 1185–1196. <https://doi.org/10.1039/C7EM00243B>
43. Tian, Z., Zhao, H., Peter, K. T., Gonzalez, M., Wetzel, J., Wu, C. et al. (2021). A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science*, 371(6525), 185–189. <https://doi.org/10.1126/science.abd6951> Erratum in: *Science*. (2022), 375(6582), Article 5785. <https://doi.org/10.1126/science.abo5785>
44. Kazmi, S. S. U. H., Xu, Q., Tayyab, M., Pastorino, P., Barcelò, D., Yaseen, Z. M. et al. (2024). Navigating the environmental dynamics, toxicity to aquatic organisms and human associated risks of an emerging tire wear contaminant 6PPD quinone. *Environmental Pollution*, 356, Article 124513. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124513>
45. Ihenetu, S. C., Xu, Q., Khan, Z. H., Kazmi, S. S. U. H., Ding, J. et al. (2024). Environmental fate of tire-rubber related pollutants 6PPD and 6PPD-Q: A review. *Environmental Research*, 258, Article 119492. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119492>
46. French, B. F., Baldwin, D. H., Cameron, J., Prat, J., King, K., Davis, J. W. et al. (2022). Urban roadway runoff is lethal to Juvenile Coho, Steelhead, and Chinook Salmonids, but not Congeneric Sockeye. *Environmental Science and Technology Letters*, 9(9), 735–738. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00467>
47. Blair, S. I., Barlow, C. H., McIntyre, J. K. (2021). Acute cerebrovascular effects in juvenile coho salmon exposed to roadway runoff. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 78(2), 103–109. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2020-0240>
48. Meador, J. P., Ball, S. C., Andrew, J. C., McIntyre, J. K. (2024). Exposure of juvenile Chinook salmon to effluent from a large urban wastewater treatment plant. Part 2. Metabolomic profiling. *Aquaculture and Fisheries*, 9(3), 367–377. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.06.008>
49. Ball, S. C., Meador, J. P., Andrew, J. C., McIntyre, J. K. (2024). Exposure of juvenile Chinook salmon to effluent from a large urban wastewater treatment plant. Part 1. Physiological responses. *Aquaculture and Fisheries*, 9(3), 355–356. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.06.006>
50. Young, W., Wiggins, S., Limm, W., Fisher, C. M., DeJager, L., Genualdi S. (2022). Analysis of per- and poly(fluoroalkyl) substances (PFASs) in highly consumed seafood products from U.S. markets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(42), 13545–13553. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04673>
51. Bedi, M., Sapozhnikova, Y., Taylor, R. B., Ng, C. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) measured in seafood from a cross-section of retail stores in the United States. *Journal of Hazardous Materials*, 459, Article 132062. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132062>
52. Habib, Z., Song, M., Ikram, S., Zahra, Z. (2024). Overview of Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Their applications, sources, and potential impacts on human health. *Pollutants*, 4, 136–152. <https://doi.org/10.3390/pollutants4010009>
53. Sunderland, E. M., Hu, X. C., Dassuncao, C., Tokranov, A. K., Wagner C. C., Allen J. G. (2019). A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(2), 131–147. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1>
54. US EPA. (2024). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Proposed PFAS national primary drinking water regulation. Retrieved from <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas> Accessed June 4, 2024.
55. European Food Safety Authority. (2020). PFAS in food: EFSA assesses risks and sets tolerable intake. Retrieved from <https://www.efsa.europa.eu/en/news/pfas-food-efsa-assesses-risks-and-sets-tolerable-intake> Accessed June 4, 2024.
56. Giraudo, M., Douville, M., Letcher, R. J., Houde, M. (2017). Effects of food-borne exposure of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to emerging brominated flame retardants 1,2-bis(2,4,6-tribromophenoxy)ethane and 2-ethylhexyl-2,3,4,5-tetrabromobenzoate. *Aquatic Toxicology*, 186, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.02.023>
57. Kratschmer, K., Schachtele A., Malisch R., Vetter W. (2019). Chlorinated paraffins (CPs) in salmon sold in southern Germany: Concentrations, homologue patterns and relation to other persistent organic pollutants. *Chemosphere*, 227, 630–637. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.016>
58. Conference of the Parties of the Stockholm Convention (COP.8) (2017). Decision SC-8/11 Listing Short-Chain Chlorinated Paraffins (SCCPs) in Annex A of the Convention. Geneva, 74 Retrieved from <https://chm.pops.int/theconvention/conferenceoftheparties/meetings/cop8/tabid/5309/default.asp> Accessed June 4, 2024.
59. McIntosh, S., King, T., Wu, D., Hodson, P.V. (2010). Toxicity of dispersed weathered crude oil to early life stages of Atlantic herring (*Clupea harengus*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(5), 1160–1167. <https://doi.org/10.1002/etc.134>
60. Forth, H. P., Rissing, M., Travers, C. (2021). Use of correlated water sample chemistry and synthetic aperture radar footprints to estimate oil concentrations in the upper water column during the Deepwater Horizon oil spill. *ACS Earth and Space Chemistry*, 5(11), 3097–3103. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00196>
61. Пряжевская, Т. С., Черкашин, С. А. (2007). Влияние нефтеуглеводородов на ранний онтогенез рыб. *Известия ТИИРО*, 149, 359–365. [Pryazhevskaya, T.S., Cherkashin, S.A. (2007). Influence of petroleum hydrocarbons on early ontogenesis of fishes. *Izvestiya TINRO*, 149, 359–365. (In Russian)]
62. Barron, M. G., Carls, M. G., Heintz, R., Rice, S. D. (2004). Evaluation of fish early life-stage toxicity models of chronic embryonic exposures to complex polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures. *Toxicological Sciences*, 78(1), 60–67. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfh051>
63. Monteiro, V., Dias da Silva, D., Martins, M., Guedes de Pinho, P., Pinto, J. (2024). Metabolomics perspectives of the ecotoxicological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons: A scoping review. *Environmental Research*, 249, Article 118394. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118394>
64. Takeshita, R., Bursian, S. J., Colegrove, K. M., Collier, T. K., Deak, K., Dean, K. M. et al. (2021). A review of the toxicology of oil in vertebrates: What we have learned following the Deepwater Horizon oil spill. *Journal of Toxicology and Environmental Health: Part B, Critical Reviews*, 24(8), 355–394. <https://doi.org/10.1080/10937404.2021.1975182>
65. Pasparakis, C., Esbaugh, A. J., Burggren, W., Grosell, M. (2019). Physiological impacts of Deepwater Horizon oil on fish. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*, 224, Article 108558. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2019.06.002>
66. Bender, M. L., Giebichenstein, J., Teisrud, R. N., Laurent, J., Frantzen, M., Meador, J. P. et al. (2021). Combined effects of crude oil exposure and warming on eggs and larvae of an arctic forage fish. *Scientific Reports*, 11(1), Article 8410. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87932-2>
67. Grosell, M., Pasparakis, C. (2021). Physiological responses of fish to oil spills. *Annual Review of Marine Science*, 13, 157–160. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-040120-094802>
68. Meador, J. P., Nahgang, J. (2019). Characterizing crude oil toxicity to early-life stage fish based on a complex mixture: Are we making unsupported assumptions? *Environmental Science and Technology*, 53(19), 11080–11092. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02889>
69. Commission Regulation (EU) 2023/915 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006. (2023). *Official Journal of the European Union*, L119, 103–157. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj> Accessed June 3, 2024.
70. Osman, A. I., Hosny, M., Eltaweil, A. S., Omar, S., Elgarahy, A. M., Farghali, M. et al. (2023). Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 2129–2169. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01593-3>
71. Kibria, G. (2023). Impacts of microplastic on fisheries and seafood security — Global analysis and synthesis. *Science of the Total Environment*, 904, Article 166652. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166652>

72. Oza, J., Rabari, V., Yadav, V. K., Sahoo, D. K., Patel, A., Trivedi, J. (2024). A systematic review on microplastic contamination in fishes of Asia: Polymeric risk assessment and future prospectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 43(4), 671–685. <https://doi.org/10.1002/etc.5821>
73. Granby, K., Bhattarai, B., Johannsen, N., Kotterman, M. J. J., Sloth, J. J., Cederberg, T. L. et al. (2024). Microplastics in feed affect the toxicokinetics of persistent halogenated pollutants in Atlantic salmon. *Environmental Pollution*, 357, Article 124421. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124421>
74. EUR-Lex (2008). Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0056> Accessed June 4, 2024.
75. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). Microplastics. Retrieved from <https://marinedebris.noaa.gov/what-marine-debris/microplastics> Accessed June 4, 2024.
76. Gomiero, A., Haave, M., Bjorøy, Ø., Herzke, D., Kögel, T., Nikiforov, V. et al. (2020). Quantification of microplastic in fillet and organs of farmed and wild salmonids- a comparison of methods for detection and quantification salmo-detect. NORCE Report 8–2020 Retrieved from <https://www.hi.no/resources/Salmodetect-report-final.pdf> Accessed June 3, 2024.
77. Landrigan, P. J., Raps, H., Cropper, M., Bald, C., Brunner, M., Canonizado, E. M. et al. (2023). The Minderoo-Monaco commission on plastics and human health. *Annals of Global Health*, 89(1), Article 23. <https://doi.org/10.5334/aogh.4056>
78. O'Neill, S. M., Carey, A. J., Harding, L. B., West, J. E., Ylitalo, G. M., Chamberlin, J. W. (2020). Chemical tracers guide identification of the location and source of persistent organic pollutants in juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*), migrating seaward through an estuary with multiple contaminant inputs. *Science of the Total Environment*, 712, Article 135516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135516>
79. Donets, M. M., Tsygankov, V. Yu., Gumovskiy, A. N., Gumovskaya, Y. P., Boyarova, M. D., Kulshova, V. I. et al. (2022). Fish as a risk source for human health: OCPs and PCBs in Pacific salmon. *Food Control*, 134, Article 108696. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108696>
80. Cunha, S. C., Trabalón, L., Jacobs, S., Castro, M., Fernandez-Tejedor, M., Granby, K. et al. (2018). UV-filters and musk fragrances in seafood commercialized in Europe Union: Occurrence, risk and exposure assessment. *Environmental Research*, 161, 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.015>
81. Carrizo, J. C., Griboff, J., Bonansea, R. I., Nimptsch, J., Valdés, M. E., Wunderlin, D. A. et al. (2021). Different antibiotic profiles in wild and farmed Chilean salmonids. Which is the main source for antibiotic in fish? *Science of the Total Environment*, 800, Article 149516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149516>
82. Undas, A. K., Escher, S., Hahn, S., Hajslova, J., Hrbek, V., Kosek, V. et al. (2024). Screening for emerging chemical risks in the food chain (SCREENER). *EFSA Journal*, 21(7), Article 8962E. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2024.EN-8962>
83. Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2006/1907/2014-04-10>. Accessed June 3, 2024.
84. Мильман, Б. Л., Журкович, И. К. (2022). Обобщенные критерии идентификации химических соединений методами хроматографии — масс-спектрометрии. *Аналитика и контроль*, 24(3), 164–173. [Milman, B. L., Zhurkovich, I. K. (2020). Summarized criteria of chemical compounds identification using the chromatography-mass spectrometry. *Analytics and Control*, 24(3), 164–173. (In Russian)] <https://doi.org/15826/analitika.2020.24.3.003>
85. Мильман, Б. Л., Журкович, И. К. (2022). Современная практика нецелевого химического анализа. *Журнал аналитической химии*, 77(5), 412–426. [Milman, B. L., Zhurkovich, I. K. (2022). Present-day practice of non-target chemical analysis. *Journal of Analytical Chemistry*, 77(5), 537–549. (In Russian)] <https://doi.org/10.31857/S0044450222050085>
86. Gómez-Regalado, M. del C., Martín-Pozo, L., Martín, J., Santos, J. L., Aparicio, I., Alonso, E. et al. (2022). An overview of analytical methods to determine pharmaceutical active compounds in aquatic organisms. *Molecules*, 27(21), Article 7569. <https://doi.org/10.3390/molecules27217569>
87. Turnipseed, S. B. (2024). Analysis of chemical contaminants in fish using high resolution mass spectrometry — A review. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 42, Article e00227. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2024.e00227>
88. Chiesa, L. M., Pavlovic, R., Panseri, S., Arioli, F. (2018). Evaluation of parabens and their metabolites in fish and fish products: A comprehensive analytical approach using LC-HRMS. *Food Additives and Contaminants: Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 35(12), 2400–2413. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1544721>
89. Baesu, A., Audet, C., Bayen, S. (2021). Application of non-target analysis to study the thermal transformation of malachite and leucomalachite green in brook trout and shrimp. *Current Research in Food Science*, 4, 707–715. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2021.09.010>
90. EUR-Lex (2021). Commission Implementing Regulation (EU) 2021/808 of 22 March 2021 on the performance of analytical methods for residues of pharmacologically active substances used in food-producing animals and on the interpretation of results as well as on the methods to be used for sampling and repealing Decisions 2002/657/EC and 98/179/EC (Text with EEA relevance). Retrieved from [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2021/808/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/808/oj) Accessed June 3, 2024.
91. Cappelto, T. (2020). NMR-Based metabolomics of aquatic organisms. *eMagRes*, 9(1), 81–100. <https://doi.org/10.1002/9780470034590.emrstm1604>
92. Lulijwa, R., Alfaro, A. C., Young, T. (2022). Metabolomics in salmonid aquaculture research: Applications and future perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 14(2), 547–577. <https://doi.org/10.1111/raq.12612>
93. Liu, L., Wu, Q., Miao, X., Fan, T., Meng, Z., Chen, X. et al. (2022). Study on toxicity effects of environmental pollutants based on metabolomics: A review. *Chemosphere*, 286(2), Article 131815. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131815>
94. Wishart, D. S., Cheng, L. L., Copié, V., Edison, A. S., Eghbalnia, H. R., Hoch, J. C. et al. (2020). NMR and metabolomics — a roadmap for the future. *Metabolites*, 23, 12(8), Article 678. <https://doi.org/10.3390/metabo12080678>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p><b>Абрамова Любовь Сергеевна</b> — доктор технических наук, профессор, заместитель директора департамента по вопросам качества пищевой рыбной продукции, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии 105187, Москва, Окружной проезд, 19 Тел. +7-915-064-77-04 E-mail: <a href="mailto:abramova@vniro.ru">abramova@vniro.ru</a> ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-8278-2760">https://orcid.org/0000-0001-8278-2760</a></p> <p><b>Козин Андрей Валерьевич</b> — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Отдел Качества пищевой рыбной продукции, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии 105187, Москва, Окружной проезд, 19 Тел. +7-916-102-93-87 E-mail: <a href="mailto:kozin@vniro.ru">kozin@vniro.ru</a> ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-8507-3548">https://orcid.org/0000-0001-8507-3548</a> * автор для контактов</p> <p><b>Гусева Елена Сергеевна</b> — специалист, Отдел Качества пищевой рыбной продукции, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии 105187, Москва, Окружной проезд, 19 Тел.: +7-917-505-92-06 E-mail: <a href="mailto:guseva@vniro.ru">guseva@vniro.ru</a> ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1377-1838">https://orcid.org/0000-0002-1377-1838</a></p>	<p><b>Liubov S. Abramova</b>, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department for the Quality of Fish Food Products, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography 19, Okruzhnoy proezd, 105187, Moscow, Russia Tel.: +7-915-064-77-04 E-mail: <a href="mailto:abramova@vniro.ru">abramova@vniro.ru</a> ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-8278-2760">https://orcid.org/0000-0001-8278-2760</a></p> <p><b>Andrey V. Kozin</b>, Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Fish Food Quality Department, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography 19, Okruzhnoy proezd, 105187, Moscow, Russia Tel.: +7-916-102-93-87 E-mail: <a href="mailto:kozin@vniro.ru">kozin@vniro.ru</a> ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-8507-3548">https://orcid.org/0000-0001-8507-3548</a> * corresponding author</p> <p><b>Elena S. Guseva</b>, Specialist, Fish Food Quality Department, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography 19, Okruzhnoy proezd, 105187, Moscow, Russia Tel.: +7-917-505-92-06 E-mail: <a href="mailto:guseva@vniro.ru">guseva@vniro.ru</a> ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1377-1838">https://orcid.org/0000-0002-1377-1838</a></p>
Критерии авторства	Contribution
<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>	<p>The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.</p>
Конфликт интересов	Conflict of interest
<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>	<p>The authors declare no conflict of interest.</p>