

Органические токсиканты в промысловых рыбах Охотского моря. Часть 1. Полициклические ароматические углеводороды в минтае тихоокеанском

Максим Михайлович ДОНЕЦ¹
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
maksim.donecz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

Максим Андреевич БЕЛАНОВ¹
младший научный сотрудник
belanov.ma@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>

Александра Дмитриевна БОРОВКОВА¹
младший научный сотрудник
borovkovasdm@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

Анна Владимировна ЛИТВИНЕНКО²
кандидат биологических наук, доцент
litvinenko.av@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3423-3860>

Кристина Руслановна МАСАЛЕВА¹
младший научный сотрудник
masaleva.kr@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-6393-8533>

Андрей Александрович ШЕСТЁРА³
магистрант
shestera.2017@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1217-7423>

Никита Дмитриевич ВАСИЛЕНКО³
магистрант
skameika00@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-2364-4658>

Владимир Алексеевич ЛЯХ^{1,3}
кандидат технических наук, декан
lyah.va@dvfu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6999-2210>

Василий Юрьевич ЦЫГАНКОВ¹
доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
tsig_90@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

³ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Аннотация. В работе исследован минтай, отобранный в Амурском лимане Охотского моря, определены концентрации полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в его органах, проанализированы их потенциальные источники поступления, проведено сравнение полученных значений с нормативной документацией различных стран мира. ПАУ обнаружены во всех образцах. Наибольшие концентрации общих и высокомолекулярных соединений зафиксированы в печени рыб, что соответствует ее наибольшей жирности и функции в организме. Уровни низкомолекулярных углеводородов достоверно не различались между органами, что говорит о хроническом характере загрязнения. Основное распределение концентраций происходило в порядке: печень > гонады самцов > икра > мышцы (достоверно или на уровне тенденции). Оценка качественного состава выявила преобладание низкомолекулярных соединений в общем профиле, среди которых доминировали нафталин, фенантрен и флуорен. Среди высокомолекулярных конгенов преобладали пирен, хризен и флуорантен. Качественный профиль ПАУ в органах минтая полностью соответствовал данным для воды, полученным ранее в этом районе. Основные индикаторные соотношения ПАУ указывают на преобладание соединений петрогенного происхождения, что соответствует специфическим геохимическим условиям Амурского лимана (наличие нефтяных залежей), а также высокой антропогенной нагрузке. Сравнение уровней ПАУ в органах рыбы с нормативами Российской Федерации и других стран выявило ее полное несоответствие требованиям безопасности ЕС для копченой продукции по содержанию суммы четырех наиболее опасных и распространенных ПАУ – бензо[а]пирена, бензо[а]антрацена, бензо[б]флуорантена и хризена. Это говорит о серьезной нагрузке ПАУ на промысловые виды гидробионтов и о необходимости актуализации действующих нормативов в части регулирования их содержания в пищевой продукции.

Ключевые слова: ПАУ, минтай, пищевая безопасность, Охотское море

Для цитирования: Донец М.М., Беланов М.А., Боровкова А.Д., Литвиненко А.В., Масалева К.Р., Шестёра А.А., Василенко Н.Д., Лях В.А., Цыганков В.Ю. Органические токсиканты в промысловых рыбах Охотского моря. Часть 1. Полициклические ароматические углеводороды в минтае тихоокеанском // Тихоокеанская география. 2026. № 3. С. 80–90. https://doi.org/10.35735/26870509_2026_27_7

Original article

Organic toxicants in commercial fish species from the Sea of Okhotsk.

Part 1. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Alaska pollock

Maksim M. DONETS¹

Candidate of Biological Sciences, Senior research associate
maksim.donecz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

Maksim A. BELANOV¹

Junior research associate
belanov.ma@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>

Alexandra D. BOROVKOVA¹

Junior research associate
borovkovasdm@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

Anna V. LITVINENKO^{1, 2}

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department
litvinenko.av@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3423-3860>

Kristina R. MASALEVA¹
Junior research associate
masaleva.kr@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-6393-8533>

Andrey A. SHESTERA³
Master's student
shestera.2017@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1217-7423>

Nikita D. VASILENKO³
Master's student
skameika00@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-2364-4658>

Vladimir A. LYAKH^{1,3}
Candidate of Technical Sciences, Dean
lyah.va@dvfu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6999-2210>

Vasiliy Yu. TSYGANKOV¹
Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Leading research associate
tsig_90@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

¹ Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

² Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

³ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are among the most priority environmental pollutants with numerous anthropogenic and natural sources. Alaska pollock (*Gadus chalcogrammus*) is one of the most important commercial fishery resources in Russia. Due to its ecological characteristics, it may be particularly susceptible to the impact of these compounds. This study investigated pollock collected in the Amur Liman of the Sea of Okhotsk, determined the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in its organs, discussed their potential sources, and compared the obtained values with regulatory standards from various countries worldwide. PAHs were detected in all samples. The highest concentrations of total and high-molecular-weight compounds were recorded in fish liver, which corresponds to its highest lipid content and function in the organism. The levels of low-molecular-weight hydrocarbons did not differ significantly between organs, indicating chronic pollution. The primary distribution of concentrations followed the order: liver > male gonads > eggs > muscle (significantly or as a trend). An assessment of qualitative composition revealed a predominance of low-molecular-weight compounds in the overall profile, among which naphthalene, phenanthrene, and fluorene were dominant. Among high-molecular-weight congeners, pyrene, chrysene, and fluoranthene predominated. The qualitative profile of the Alaska pollock completely matched previously obtained PAH levels in water for this area. Key diagnostic ratios of PAHs indicate a predominance of compounds of petrogenic origin, which corresponds to the specific geochemical conditions of the Amur Liman (presence of oil deposits) as well as high anthropogenic pressure. Comparing PAH levels in fish organs with Russian and international standards revealed its complete non-compliance with safety requirements for smoked products concerning the content of the sum of four of the most hazardous and widespread PAHs – benzo[a]pyrene, benzo[a]anthracene, benzo[b]fluoranthene, and chrysene – as stipulated by the EU. This points to a serious PAH burden on commercial aquatic species and underscores the need to update existing regulations regarding the control of their content in food products.

Keywords: PAH, Alaska pollock, food safety, Sea of Okhotsk

For citation: Donets M.M., Belanov M.A., Borovkova A.D., Litvinenko A.V., Masaleva K.R., Shestera A.A., Vasilenko N.D., Lyakh V.A., Tsygankov V.Yu. Organic toxicants in commercial fish species from the Sea of Okhotsk. Part 1. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Alaska pollock. *Pacific Geography*. 2026;(3):80–90. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2026_27_7

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – большая группа загрязняющих веществ, широко распространенная в окружающей среде. Их образование связано прежде всего с высокотемпературными пиролизическими и геохимическими процессами, в связи с чем они активно образуются в процессе хозяйственной деятельности человека [1]. ПАУ содержат в составе молекулы два и более ароматических кольца, в соответствии с чем их делят на низкомолекулярные («легкие», содержат 2–3 кольца) и высокомолекулярные («тяжелые», содержат 4–6 колец) [2]. Они считаются канцерогенными соединениями и способны оказывать тератогенное и мутагенное воздействие на водные организмы, а также на человека в результате употребления морепродуктов [1]. За счет своих свойств наиболее опасные ПАУ (16 приоритетных) включены во многие списки токсикантов для обязательного мониторинга загрязнения окружающей среды Агентством по защите окружающей среды США (US EPA), Европейским Союзом в рамках Water Framework Directive 2000/60/EC и др. [3, 4].

Минтай тихоокеанский (*Gadus chalcogrammus* Pallas, 1814) – один из наиболее важных промысловых объектов Российской Федерации. Ежегодный улов этой рыбы колеблется от 1921 до 2000 тыс. т, составляя до половины общего вылова рыбной продукции в стране [5]. Несмотря на высокую важность с точки зрения обеспечения продовольственной безопасности, а также высокую значимость для экосистем [6, 7], данные о содержании токсичных соединений в этом виде рыб фактически отсутствуют в научной литературе. Учитывая особенности жизненной стратегии минтая – вертикальные миграции и способность питаться в том числе в придонном слое, уровни ПАУ в его органах могут быть весьма значительны [8]. Цель работы – определить концентрации полициклических ароматических углеводородов в органах минтая тихоокеанского (*G. chalcogrammus*), предположить потенциальные источники поступления ПАУ в организм рыбы и сравнить полученные значения с нормативной документацией различных стран мира.

Материалы и методы

Образцы отбирались в октябре–ноябре 2023 г. в Амурском лимане (северо-западная часть Охотского моря). Исследовано 50 особей половозрелых рыб со средним размером 583.9 ± 47.8 мм и массой 1054.0 ± 351.1 г. После вылова рыб измеряли, взвешивали, замораживали при -20 °C и транспортировали в лабораторию. После извлечения органов из тушек рыб пробы лиофилизировали с использованием лиофильной сушки FD-1A-50 (Shanghai Bilon Instrument Co., Ltd, Shanghai, China) и измельчали. Выделение ПАУ (нафталин (NAP), аценафтен (AC), флуорен (FL), фенантрен (PHE), антрацен (AN), флуорантен (FA), пирен (PY), бензо[а]антрацен (BaA), хризен (CHR), бензо[б]флуорантен (BbFA), бензо[к]флуорантен (BkFA), бензо[а]пирен (BaP), бензо[g,h,i]перилен (BghiP), дибензо[а,h]антрацен (DBahA)) осуществляли с помощью смеси гексана и ацетона (1:1) с использованием ультразвука. Липиды удаляли колоночной хроматографией с использованием фильтра Шотта и оксида алюминия. Инструментальное определение осуществляли на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu GC-MS QP 2010 Ultra, оснащенный автодозатором AOC-5000 и капиллярной колонкой SLB-5ms (Supelco). Для контроля качества и выполнения аналитических процедур на регулярной основе использовались холостые и смешанные образцы. Перед каждой серией проб в хроматограф закалывали стандартные смеси для удостоверения в стабильности времени выхода соединений [9]. Статистический анализ проводили с использованием программного обеспечения R 4.2.2 для операционной системы Windows 10.

Результаты и их обсуждение

Концентрации ПАУ. Полициклические ароматические углеводороды обнаружены во всех проанализированных образцах минтая тихоокеанского (рис. 1). Печень, как основной метаболически активный и «жирный» орган (рис. 1, А), характеризовалась достоверно большими уровнями аккумуляции высокомолекулярных конгенов (Σ ВМ-ПАУ) и общего содержания Σ ПАУ, по сравнению с мышцами и икрой (рис. 1, В, Г). Уровни токсикантов в гонадах самцов достоверно не отличались от печени, что это может быть связано с малой выборкой этого органа.

Уровни низкомолекулярных (Σ НМ-ПАУ) конгенов достоверно не различались (рис. 1, Б), что может указывать на хроническое загрязнение с постоянным уровнем этих поллютантов в окружающей среде и объектах питания минтая. В то же время концентрации этой группы токсикантов имели тенденцию к распределению в порядке: гонады самцов > печень > икра > мышцы.

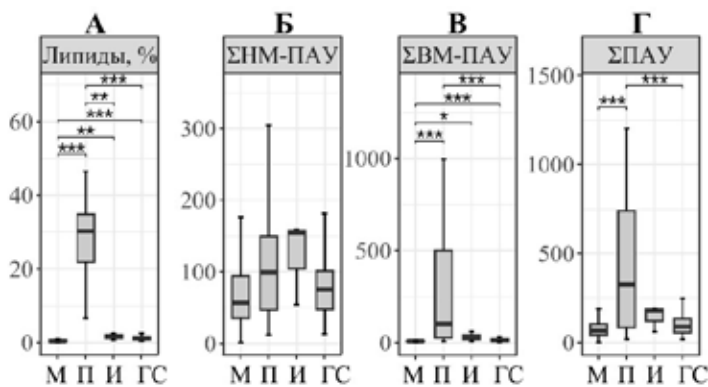


Рис. 1. Содержание липидов (%) и суммарные концентрации низкомолекулярных (Σ НМ-ПАУ = NAP + AC + FL + PHE + AN), высокомолекулярных (Σ ВМ-ПАУ = FA + PY + BaA + CHR + BbF + BkF + BaP + DBahA + BghiP) и суммарных полициклических ароматических углеводородов (Σ ПАУ = Σ НМ-ПАУ + Σ ВМ-ПАУ) в органах минтая тихоокеанского (*Gadus chalcogrammus*) (нг/г сырой массы): М – мышцы, П – печень, И – икра, ГС – гонады самцов

Fig. 1. Lipid content (%) and total concentrations of low molecular weight (Σ LMW-PAH = NAP + AC + FL + PHE + AN), high molecular weight (Σ HMW-PAH = FA + PY + BaA + CHR + BbF + BkF + BaP + DBahA + BghiP) and total polycyclic aromatic hydrocarbons (Σ PAH = Σ LMW-PAH + Σ HMW-PAH) in the organs of Alaska pollock (*Gadus chalcogrammus*) (ng/g wet weight)

НМ-ПАУ характеризуются большей способностью к распределению по организму, а также способны преодолевать его физиологические и физико-химические барьеры [1]. Таким образом, более равномерное распределение этой группы соединений по организму рыб, вероятно, связано с их меньшей молекулярной массой и большей «подвижностью».

ВМ-ПАУ считаются более опасными конгенерами, чем НМ-ПАУ. Это связано с особенностями их метаболизма, приводящего к образованию более токсичных форм, способных вызывать хронические последствия для организма [9]. В отличие от других опасных представителей антропогенных ксенобиотиков, ПАУ могут быть переработаны ферментативными системами организма [10], что может обуславливать их преимущественное накопление в печени. Кроме того, эти токсиканты относят к липофильным поллютантам [9], в связи с чем их накопление в этом «жирном» органе закономерно.

При рассмотрении качественного состава ПАУ в большинстве органов видно преобладание низкомолекулярных конгенов, за исключением печени (рис. 2).

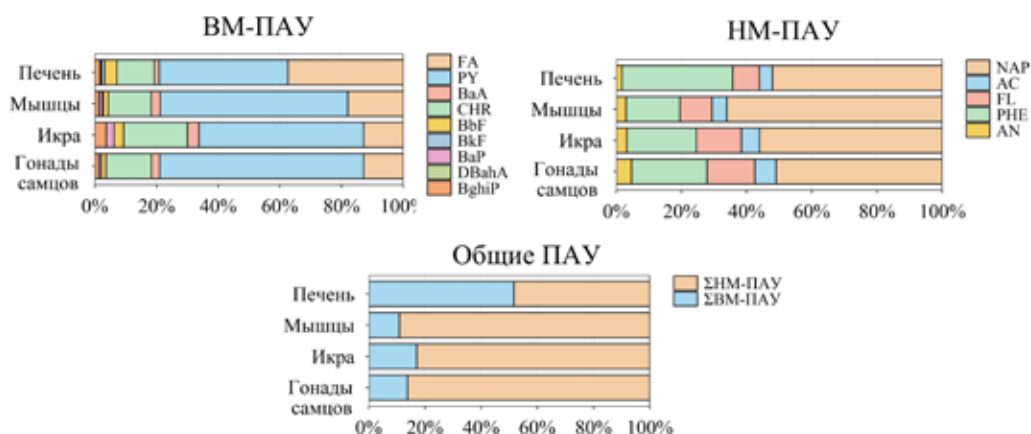


Рис. 2. Качественный состав общих, низкомолекулярных (НМ) и высокомолекулярных (ВМ) полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в органах минтая тихоокеанского: NAP – нафталин, AC – аценафтен, FL – флуорен, PHE – фенантрен, AN – антрацен, FA – флуорантен, PY – пирен, BaA – бензо[а]антрацен, CHR – хризен, BbF – бензо[б]флуорантен, BkF – бензо[к]флуорантен, BaP – бензо[а]пирен, BghiP – бензо[г, h, i]перилен, DBaH A – дибензо[а, h]антрацен

Fig. 2. Qualitative composition of total, low molecular weight (LMW), and high molecular weight (HMW) polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the organs of Alaska pollock: NAP – naphthalene, AC – acenaphthene, FL – fluorene, PHE – phenanthrene, AN – anthracene, FA – fluoranthene, PY – pyrene, BaA – benzo[a]anthracene, CHR – chrysene, BbF – benzo[b]fluoranthene, BkF – benzo[k]fluoranthene, BaP – benzo[a]pyrene, BghiP – benzo[g, h, i]perylene, DBaH A – dibenzo[a, h]anthracene

При этом качественный состав внутри подгрупп (НМ-ПАУ и ВМ-ПАУ) был схож. Среди НМ-ПАУ преобладали нафталин, фенантрен и флуорен, среди ВМ-ПАУ – пирен, флуорантен и хризен (рис. 2). Сходный качественный состав в разных органах и относительная выравненность концентраций подтверждают теорию о хроническом загрязнении. Схожие данные обнаружены в 2006 г. при определении содержания ПАУ в растворенной форме в водах Амурского лимана [11]. Доли нафталина, фенантрена и флуорена среди НМ достигали 79, 21 и 8 %, а пирена и хризена (среди ВМ) – 63 и 10 % соответственно. Учитывая, что исследование воды проводилось в июне 2006 г., а отбор рыб – в октябре–ноябре 2023 г., хронический характер загрязнения в этом районе является наиболее вероятным объяснением схожести качественного состава.

Источники ПАУ. Помимо молекулярной массы, ПАУ различают в зависимости от источника поступления в окружающую среду. Например, ПАУ, образующиеся в результате сжигания или других высокотемпературных процессов, называют пирогенными; поступающие в связи с разливами нефти, продуктов ее переработки, а также естественными выходами – петрогенными; образующиеся в результате воздействия микроорганизмов – диагенетическими [1]. Первые две группы являются наиболее распространенными и в настоящее время попадают в окружающую среду преимущественно в результате антропогенной деятельности.

Для определения происхождения ПАУ используются индикаторные соотношения конгенов или их сумм [1]. Подобное разделение возможно за счет того, что часть конгенов образуется при сравнительно низкой энергии («термодинамические» изомеры), а часть – в условиях повышенной температуры (менее стабильные «кинетические» изомеры), за счет чего они отражают петрогенные и пирогенные процессы соответственно. Например, преобладание НМ-ПАУ относительно ВМ-ПАУ указывает на петрогенные источники загрязнения; 10-кратное большее содержание фенантрена относительно антрацена – на пирогенные источники. В таблице представлены результаты расчетов индикаторных значений, указывающие на смешанный характер загрязнения с преобладанием петрогенных источников.

Индикаторные соотношения полициклических ароматических углеводородов
в органах минтая тихоокеанского из Амурского лимана

Table. Diagnostic ratios of polycyclic aromatic hydrocarbons in the organs of Alaska pollock from the Amur Liman

Орган	$\frac{\text{НМ-ПАУ}}{\text{ВМ-ПАУ}}$	$\frac{\text{NAP}}{\text{PHE}}$	$\frac{\text{PHE}}{\text{AN}}$	$\frac{\text{FA}}{\text{PY}}$	$\frac{\text{FA}}{\text{FA + PY}}$	$\frac{\text{PHE/AN}}{\text{FA/PY}}$	$\frac{\text{AN}}{\text{AN + PHE}}$	$\frac{\text{BaA}}{\text{BaA + CHR}}$
Мышцы	7.93	3.70	5.62	0.28	0.21	21.68	0.15	0.17
Печень	2.08	1.01	27.46	0.77	0.40	36.89	0.04	0.14
Гонады самцов	6.50	2.37	4.95	0.19	0.16	25.77	0.17	0.15
Икра	5.48	2.40	6.48	0.23	0.18	31.83	0.14	0.15
Пирогенные	< 1	> 1	< 10	> 1	> 0.50	< 10	> 0.10	> 0.35
Петрогенные	> 1	< 1	> 10	< 1	< 0.40	> 10	< 0.10	< 0.20

Примечание. НМ-ПАУ – низкомолекулярные ПАУ, ВМ-ПАУ – высокомолекулярные ПАУ, NAP – нафталин, PHE – фенантрен, AN – антрацен, FA – флуорантен, PY – пирен, BaA – бензо[а]антрацен, CHR – хризен; серые ячейки указывают на петрогенное происхождение.

Побережье о-ва Сахалин является одним из основных нефтегазоносных районов Дальнего Востока России. В Амурском лимане расположено месторождение федерального значения с запасами (по предварительным данным) до 8.0 млн т нефти [12]. Несмотря на отсутствие разработки месторождения, нефть может просачиваться из нефтеносных пластов и таким образом попадать в окружающую среду [13]. Кроме того, в Татарском проливе, где циркулируют два разнонаправленных течения, проходящих через Амурский лиман [14], за последние 10 лет было зафиксировано два крупных инцидента вблизи порта Невельск, связанных с разливами нефти: посадка на мель танкера «Надежда» [15] и столкновение плоскодонной баржи [16]. Кроме того, в ходе спутникового мониторинга загрязнения нефтью акватории Татарского пролива в 2021 г. зафиксировано 19 разливов [17].

Таким образом, загрязнение Амурского лимана ПАУ может быть обусловлено как местными геохимическими и геологическими особенностями, которые вызывают естественное повышение уровней петрогенных ПАУ в окружающей среде и в морских организмах, так и антропогенными – за счет активного судоходства. В этом случае абиотические компоненты (вода и донные отложения) могут быть основным источником загрязняющих веществ в рыбе [18], особенно учитывая трофические особенности минтая (бентофагия) [8]. В целом сходные выводы были сделаны для рыб из оз. Чаоху (Китай) [19], где обнаружена сильная положительная корреляция между содержанием ПАУ в окружающей среде и в гидробионтах. Таким образом, вода как среда обитания может быть важным источником ПАУ для рыбы в исследуемом районе.

Нормирование ПАУ в объектах рыболовства. Одной из ключевых проблем исследования ПАУ на современном этапе развития науки является нормирование их содержания в окружающей среде, в особенности в объектах аквакультуры и других пищевых продуктах [20]. Из-за их меньшей устойчивости по сравнению с некоторыми другими ксенобиотиками содержание ПАУ в пищевых продуктах во многих странах полностью или почти не регламентировано, как, например, в Канаде и США [21].

В целом большая часть нормативного обеспечения сосредоточена на регулировании бензо[а]пирена в копченых продуктах, поскольку считается, что он в достаточной степени отражает общее содержание ПАУ в пищевых продуктах [22]. Однако исследование Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов показало, что бензо[а]пирен составляет не более 30 % от канцерогенных ПАУ, обнаруживаемых в образцах пищи, в связи с чем с 2011 г. в странах ЕС наряду с этим соединением нормируется суммарное содержание четырех наиболее распространенных представителей канцерогенных ПАУ – бензо[а]пирена, бензо[а]антрацена, бензо[б]флуорантена и хризена (ΣПАУ₄) [20, 22]. Однако оценка проводится исключительно для копченых продуктов [23]. В целом многие страны ориентируются на стандарты Европейского Союза для доступа к местным рынкам, в связи с чем не вводят внутренние нормативы.

Другим довольно распространенным способом оценки безопасности пищевых продуктов по содержанию ПАУ является оценка их эквивалентной токсичности относительно бензо[а]пирена (TEQ_{BaP}), как наиболее токсичного конгенера. В этом случае общая сумма токсического эквивалента сравнивается с нормативом для этого соединения и делается вывод о потенциальных последствиях для здоровья человека [1].

При сравнении уровней бензо[а]пирена, ΣPAU_4 и TEQ_{BaP} в органах минтая с нормативами различных стран мира видно, что содержание бензо[а]пирена и TEQ_{BaP} в исследованных органах минтая не превышает допустимые уровни, установленные нормативами Российской Федерации, Китая и Турции, в то же время обнаруженные уровни достигают от 50 до 75 % отечественных нормативов [23–26].

Часть образцов печени характеризовалась превышением нормативов ЕС – существенно более строгих, чем российские – по BaP (29.4 %) и TEQ_{BaP} (44.4 %). Более того, уровни ПАУ фактически во всех проанализированных органах рыб превышали установленные в Европе уровни суммы четырех индикаторных ПАУ, использующиеся для оценки безопасности копченой продукции [23]. Такие результаты являются особенно настораживающими, поскольку концентрации полициклических ароматических углеводородов, как правило, не изменяются при тепловой обработке, а чаще – увеличиваются [27, 28]. Это указывает на необходимость проведения современных гигиенических и токсикологических изысканий для определения необходимости ужесточения и введения новых нормативов в РФ. В то же время подтверждается, что BaP не является адекватным индикатором присутствия ПАУ в пищевых продуктах и должен быть заменен на более комплексные индикаторы доброкачественности сырья.

Заключение и выводы

Таким образом, полициклические ароматические углеводороды обнаружены во всех образцах минтая тихоокеанского (*Gadus chalcogrammus*). Аккумуляция этих ксенобиотиков в органах рыб связана прежде всего со специфическими геохимическими условиями среды обитания – вероятным наличием естественных выходов нефти, активным судоходством, а также воздействием стока р. Амур и специфического характера течений. Полученные концентрации ПАУ соответствуют требованиям безопасности, предъявляемым в Российской Федерации к копченым продуктам, однако по сумме токсического эквивалента достигают порядка 70 % от этого значения. В то же время фактически во всех органах рыб зафиксировано несоответствие суммарных уровней бензо[а]пирена, бензо[а]антрацена, бензо[б]флуорантена и хризена требованиям ЕС, что указывает на существование потенциальных рисков для здоровья потребителей. Необходимо продолжать мониторинговые исследования ПАУ для выявления степени их распространения в объектах промышленного рыболовства и формирования доказательной базы для обновления нормативной базы Российской Федерации.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 23-74-10032).

Acknowledgments. The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-74-10032).

Литература

1. Donets M.M., Borovkova A.D., Belanov M.A., Boychenko T. V., Tsygankov V.Yu. Polycyclic aromatic hydrocarbons in bivalves from the Black Sea // Environmental Chemistry Letters. 2026. Vol. 24, N 1. P. 251–274.
2. Purcaro G., Moret S., Conte L.S. Overview on polycyclic aromatic hydrocarbons: Occurrence, legislation and innovative determination in foods // Talanta. 2013. Vol. 105. P. 292–305.

3. Pampanin D.M., Kemppainen E.K., Skogland K., Jørgensen K.B., Sydnes M.O. Investigation of fixed wave-length fluorescence results for biliary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons formed in Atlantic cod (*Gadus morhua*) // *Chemosphere*. 2016. Vol. 144. P. 1372–1376.
4. Lille-Langøy R., Jørgensen K.B., Goksøy A., Pampanin D. M., Sydnes M.O., Karlsen O.A. Substituted Two- to Five-Ring Polycyclic Aromatic Compounds Are Potent Agonists of Atlantic Cod (*Gadus morhua*) Aryl Hydrocarbon Receptors Ahrla and Ahra2a // *Environmental Science & Technology*. 2021. Vol. 55, N 22. P. 15123–15135.
5. Статистика добычи (вылова) водных биологических ресурсов // Федеральное агентство по рыболовству. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fish.gov.ru/otraslevaya-deyatelnost/ekonomika-otrasli/statistika-i-analitika/> (дата обращения: 25.01.2025).
6. Aydin K., Mueter F. The Bering Sea – A dynamic food web perspective // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2007. Vol. 54, N 23–26. P. 2501–2525.
7. Strasburger W.W., Hillgruber N., Pinchuk A.I., Mueter F.J. Feeding ecology of age-0 walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in the southeastern Bering Sea // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2014. Vol. 109. P. 172–180.
8. Орлова С.Ю., Сергеев А.А., Курносов Д.С., Бочарова Е.С., Емельянова О.Р., Чикурова Е.А., Орлов А.М., Глубоковский М.К. Популяционная структура минтая азиатской части ареала на основании данных различных генетических маркеров // *Труды ВНИРО*. 2022. Т. 189. С. 180–197.
9. Tsygankov V., Donets M.M., Gumovskaya Yu.P., Lyagusha M.S., Gumovskiy A.N., Chernyaev A.P. Methods to Determine Persistent Organic Pollutants in Various Components of Ecosystems in the Far Eastern Region // *Persistent Organic Pollutants in the Ecosystems of the North Pacific*. Springer Cham, 2023. P. 49–57.
10. Barbosa F., Rocha B.A., Souza M.C.O., Bocato M.Z., Azevedo L.F., Adeyemi J.A., Santana A., Campiglia A.D. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Updated aspects of their determination, kinetics in the human body, and toxicity // *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 2023. Vol. 26, N 1. P. 28–65.
11. Honda M., Suzuki N. Toxicities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for Aquatic Animals // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, N 4. P. 1363.
12. Чинова Т.Л., Тищенко П.Я., Кондратьева Л.М., Кудряшова Ю.В., Каваниши Т. Полициклические ароматические углеводороды в эстуарии р. Амур // *Вода: Химия и Экология*. 2013. № 10 (64). С. 14–22.
13. Амур-Лиманский участок недр федерального значения, расположенного в Амурском лимане Охотского моря – справка о месторождении // *Углеводороды.ру*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://uglevodorody.ru/field/amur-limanskiy-uchastok-ne-dr-federalnogo-znacheniya-raspolozhennogo-v-amurskom-limane> (дата обращения: 09.04.2025).
14. Panieri G., Argentino C., Ramalho S. P., Vulcano F., Savini A., Fallati L., Brekke T., Galimberti G., Riva F., Balsa J., Eilertsen M.H., Stokke R., Steen I.H., Sahy D., Kalenitchenko D., Büenz S., Mattingsdal R. An Arctic natural oil seep investigated from space to the seafloor // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 907. P. 167788.
15. Andreev A.G. Mesoscale Circulation of Waters in the Region of the East Sakhalin Current (the Sea of Okhotsk) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. Vol. 56, N 12. P. 1628–1637.
16. Крупные разливы нефти и нефтепродуктов в России в 1994–2021 годах [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gia.ru/20210811/razliv-1745316414.html> (дата обращения: 07.04.2025).
17. На акватории терминала Бошняково в Татарском проливе завершилась операция ЛРН // Сетевое издание «КОРАБЕЛ.РУ». [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.korabel.ru/news/comments/na_akvatorii_terminala_boshnyakovo_v_tatarskom_prolyve_zavershilas_operaciya_lrn.html (дата обращения: 07.04.2025).
18. Марченко М.О., Бессонов П.С., Дубина В.А., Круглик И.А. Результаты спутникового радиолокационного мониторинга нефтяных разливов с судов в Татарском проливе Японского моря // *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2023. Т. 65, № 3. С. 82–90.
19. Broman D., Näuf C., Lundbergh I., Zebühr Y. An in situ study on the distribution, biotransformation and flux of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an aquatic food chain (seston – *Mytilus edulis* L. – *Somateria mollissima* L.) from the Baltic: An ecotoxicological perspective // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1990. Vol. 9, N 4. P. 429–442.
20. Qin N., He W., Liu W., Kong X., Xu F., Giesy J. P. Tissue distribution, bioaccumulation, and carcinogenic risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic organisms from Lake Chaohu, China // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 749. P. 141577.
21. Sampaio G.R., Guizzellini G.M., Da Silva S.A., De Almeida A.P., Pinaffi-Langley A.C.C., Rogero M.M., De Camargo A.C., Torres E.A.F.S. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Foods: Biological Effects, Legislation, Occurrence, Analytical Methods, and Strategies to Reduce Their Formation // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22, N 11. C. 6010.
22. Environmental Protection Agency Consumer Factsheet on: BENZO(A)PYRENE. United States Environmental Protection Agency. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://archive.epa.gov/water/archive/web/pdf/archived-consumer-factsheet-on-benzo.pdf> (дата обращения: 02.06.2025).
23. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food – Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain // *The EFSA Journal*. 2008. Vol. 724. P. 1–114.
24. Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006 (Text with EEA relevance) // *Official Journal of the European Union*. 2023. Vol. 50 119/103. P. 103–157. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj/eng> (дата обращения: 04.02.2026).

25. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» // Комиссия Таможенного союза. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=479846#h1662> (дата обращения: 04.02.2026).

26. Стандарт КНР GB 2762-2022 МДУ загрязняющих веществ в пищевой продукции // Федеральная служба по ветеринарному и фитосанитарному надзору (Россельхознадзор). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fsvps.gov.ru/files/standart-kr-gb-2762-2022-mdu-zagraznjajushhih-veshhestv-v-pishhevoj-produkcii/> (дата обращения: 04.02.2026).

27. Sahin S., Ulusoy H.I., Alemdar S., Erdogan S., Agaoglu S. The Presence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Grilled Beef, Chicken and Fish by Considering Dietary Exposure and Risk Assessment // Food Science of Animal Resources. 2020. Vol. 40, N 5. P. 675–688.

28. Sharifiarab G., Ahmadi M., Shariatifar N., Ariaii P. Investigating the effect of type of fish and different cooking methods on the residual amount of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in some Iranian fish: A health risk assessment // Food Chemistry: X. 2023. Vol. 19. P. 100789.

References

1. Donets, M.M.; Borovkova, A.D.; Belanov, M.A.; Boychenko, T.V.; Tsygankov, V.Yu. Polycyclic aromatic hydrocarbons in bivalves from the Black Sea. *Environmental Chemistry Letters*. 2026;(24(1)):251–274.
2. Purcaro, G.; Moret, S.; Conte, L.S. Overview on polycyclic aromatic hydrocarbons: Occurrence, legislation and innovative determination in foods. *Talanta*. 2013;(105):292–305.
3. Pampanin, D.M.; Kempainen, E.K.; Skogland, K.; Jørgensen, K.B.; Sydnes, M.O. Investigation of fixed wavelength fluorescence results for biliary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons formed in Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Chemosphere*. 2016;(144):1372–1376.
4. Lille-Langøy, R.; Jørgensen, K.B.; Goksøyr, A.; Pampanin, D.M.; Sydnes, M.O.; Karlsen, O.A. Substituted Two- to Five-Ring Polycyclic Aromatic Compounds Are Potent Agonists of Atlantic Cod (*Gadus morhua*) Aryl Hydrocarbon Receptors Ahrla and Ahrla2a. *Environmental Science & Technology*. 2021;55(22):15123–15135.
5. Federal Agency for Fishery. Statistics of catch of aquatic biological resources. Available online: <https://fish.gov.ru/otraslevaya-deyatelnost/ekonomika-otrasli/statistika-i-analitika/> (In Russian). [Accessed: 25.01.2025].
6. Aydin, K.; Mueter, F. The Bering Sea – A dynamic food web perspective. *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2007;54(23–26):2501–2525.
7. Strasburger, W.W.; Hillgruber, N.; Pinchuk, A.I.; Mueter, F.J. Feeding ecology of age-0 walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) and Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in the southeastern Bering Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2014;(109):172–180.
8. Orlova, S.Yu.; Sergeev, A.A.; Kurnosov, D.S.; Bocharova, E.S.; Emelyanova, O.R.; Chikurova, E.A.; Orlov, A.M.; Glubokovsky, M.K. Population structure of walleye pollock in the Asian part of the range based on various genetic markers. *Trudy VNIRO*. 2022;(189): 180–197. (In Russian).
9. Tsygankov, V., Donets, M.M., Gumovskaya, Yu.P., Lyagusha, M.S., Gumovskiy, A.N., Chernyaev, A.P. Methods to Determine Persistent Organic Pollutants in Various Components of Ecosystems in the Far Eastern Region. In *Persistent Organic Pollutants in the Ecosystems of the North Pacific*: Springer Cham, 2023:49–57.
10. Barbosa, F.; Rocha, B.A.; Souza, M.C.O.; Bocato, M.Z.; Azevedo, L.F.; Adeyemi, J.A.; Santana, A.; Campiglia, A.D. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Updated aspects of their determination, kinetics in the human body, and toxicity. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 2023;(26(1)):28–65.
11. Honda, M.; Suzuki, N. Toxicities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for Aquatic Animals. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(4): 1363.
12. Chizhova, T.L.; Tishchenko, P.Ya.; Kondratyeva, L.M.; Kudryashova, Yu.V.; Kavanishi, T. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the Amur River Estuary. *Water: Chemistry and Ecology*. 2013;10 (64):14–22. (In Russian)
13. Amur-Limansky subsoil plot of federal significance, located in the Amur Liman of the Sea of Okhotsk – field reference. Available online: <https://uglevodorody.ru/field/amur-limanskiy-uchastok-nedr-federalnogo-znacheniya-raspolzhenogo-v-amurskom-limane> (In Russian). [Accessed: 09.04.2025].
14. Panieri, G.; Argentino, C.; Ramalho, S.P.; Vulcano, F.; Savini, A.; Fallati, L.; Brekke, T.; Galimberti, G.; Riva, F.; Balsa, J.; Eilertsen, M.H.; Stokke, R.; Steen, I.H.; Sahy, D.; Kalenitchenko, D.; Büenz, S.; Matningsdal, R. An Arctic natural oil seep investigated from space to the seafloor. *Science of The Total Environment*. 2024;(907):167788.
15. Andreev, A.G. Mesoscale Circulation of Waters in the Region of the East Sakhalin Current (the Sea of Okhotsk). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020;56(12):1628–1637.
16. Major oil and petroleum product spills in Russia in 1994–2021. RIA Novosti. Available online: <https://ria.ru/20210811/razliv-1745316414.html> (In Russian). [Accessed: 07.04.2025].
17. The LRN operation on the water area of the Boshnyakovo terminal in the Tatar Strait has been completed. Available online: https://www.korabel.ru/news/comments/na_akvatorii_terminala_boshnyakovo_v_tatarskom_prolive_zavershilas_operaciya_lrn.html (In Russian). [Accessed: 07.04.2025].
18. Marchenko, M.O.; Bessonov, R.S.; Dubina, V.A.; Kruglik, I.A. Results of satellite radar monitoring of oil spills from ships in the Tatar Strait of the Sea of Japan. *Nauchnye Trudy Dalrybvtyuza*. 2023;65(3):82–90. (In Russian).

19. Broman, D.; Näuf, C.; Lundbergh, I.; Zebühr, Y. An in situ study on the distribution, biotransformation and flux of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an aquatic food chain (seston – *Mytilus edulis* L. – *Somateria mollissima* L.) from the Baltic: An ecotoxicological perspective. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1990;9(4):429–442.
20. Qin, N.; He, W.; Liu, W.; Kong, X.; Xu, F.; Giesy, J.P. Tissue distribution, bioaccumulation, and carcinogenic risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic organisms from Lake Chaohu, China. *Science of The Total Environment*. 2020;(749):141577.
21. Sampaio, G.R.; Guizzellini, G.M.; Da Silva, S.A.; De Almeida, A.P.; Pinaffi-Langley, A.C.C.; Rogero, M.M.; De Camargo, A.C.; Torres, E.A.F.S. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Foods: Biological Effects, Legislation, Occurrence, Analytical Methods, and Strategies to Reduce Their Formation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(11):6010.
22. United States Environmental Protection Agency. Consumer Factsheet on: BENZO(A)PYRENE. Available online: <https://archive.epa.gov/water/archive/web/pdf/archived-consumer-factsheet-on-benzo.pdf> [Accessed: 02.06.2025].
23. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food – Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. The EFSA Journal. 2008;(724):1–114.
24. Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006 (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union. 2023, L 119/103, 103–157. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj/eng> [Accessed: 04.02.2026].
25. Technical Regulations of the Customs Union TR CU 021/2011 “On food safety”. Commission of the Customs Union. (In Russian). Available online: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=479846#h1662> [Accessed: 04.02.2026].
26. PRC Standard GB 2762-2022 Maximum levels of contaminants in food. Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Surveillance (Rosselkhoznadzor). (In Russian). Available online: <https://fsvps.gov.ru/files/standart-knr-gb-2762-2022-mdu-zagraznjajushhih-veshhestv-v-pishhevoj-produkcii/> [Accessed: 04.02.2026].
27. Sahin, S.; Ulusoy, H.I.; Alemdar, S.; Erdogan, S.; Agaoglu, S. The Presence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Grilled Beef, Chicken and Fish by Considering Dietary Exposure and Risk Assessment. *Food Science of Animal Resources*. 2020;40(5):675–688.
28. Sharifiarab, G.; Ahmadi, M.; Shariatifar, N.; Ariaei, P. Investigating the effect of type of fish and different cooking methods on the residual amount of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in some Iranian fish: A health risk assessment. *Food Chemistry: X*. 2023;(19):100789.

Статья поступила в редакцию 16.02.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 12.03.2026.

The article was submitted 16.02.2026; approved after reviewing 12.03.2026; accepted for publication 12.03.2026.

