

**ИЗМЕНЕНИЯ В СПЕКТРЕ ЖИРНОКИСЛОТНОГО
СОСТАВА ПРИ ПЕРЕКИСНОМ ОКИСЛЕНИИ
ЛИПИДОВ СИГОВЫХ РЫБ (COREGONIDAE)
ИЗ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОДОЁМОВ И АКВАКУЛЬТУРЫ**

© 2024 г. **И.Н. Остроумова** (spin: 3138-7969), **Ю.Н. Лукина** (spin: 3429-0446),
А.А. Лютиков (spin: 9187-6075), **А.К. Шумилина** (spin: 5073-8359)

*Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского
института рыбного хозяйства и океанографии (ГосНИОРХ им. Л.С. Берга),
Россия, Санкт-Петербург, 199053
E-mail: irinaostroum@yandex.ru*

Поступила в редакцию 11.09.2023 г.

Проведено сравнение жирнокислотного состава липидов печени и мышечной ткани сиговых рыб из водоёмов разной степени загрязнения и выращиваемых на искусственных кормах в аквакультуре. Повышение нефтяного загрязнения воды приводило к увеличению продуктов окисления липидов и истощению антиоксидантов в организме рыб, что вызывало структурную перестройку жирных кислот в негативную сторону. В аквакультуре сходные изменения происходили у рыб на кормах с повышенным сроком хранения. Добавление в состав рационов витамина С и сорбента, обладающих противоокислительными свойствами, улучшало антиоксидантную систему и состав жирных кислот. Наибольшие изменения при окислении происходили в полиненасыщенных жирных кислотах (ПНЖК). У рыб из чистого водоёма их содержание в печени было высоким (55,8%). В загрязнённых акваториях ПНЖК снижались до 37,9 и 33,4%, в основном за счёт докозагексаеновой кислоты. В аквакультуре их содержание было ниже даже в печени рыб, получавших свежие корма (36,0–38,0%) и корма с добавкой антиоксидантов (40,0–43,4%). Характерной особенностью жирнокислотного состава печени диких рыб является высокое содержание арахидоновой кислоты – 7,9% из чистого водоёма и 5,1 и 2,5% из загрязнённых участков. У культивируемых рыб её содержание не превышало единицы.

Ключевые слова: сиговые рыбы Coregonidae, перекисное окисление липидов, загрязнение естественных водоёмов, аквакультура, окисленные корма, полиненасыщенные жирные кислоты, омега-3 кислоты, мононенасыщенные жирные кислоты.

ВВЕДЕНИЕ

Все аэробные животные, получая энергию при использовании кислорода для биологического ступенчатого окисления липидов, испытывают проблему токсического неферментативного окисления жиров свободным кислородом, в случае преобладания этого процесса над антиоксидантной функцией. От регуляции этих процессов, от сдерживания антиоксидантами свободно-радикального окисления липидов зависит жизнь и здоровье биологических индивидуумов. Рыбы, обладающие высокой степенью ненасыщенности

жиров, особенно подвержены интенсивному перекисному окислению липидов (ПОЛ). При этом нарушается динамическое равновесие между окислителями и антиоксидантами и возникает оксидативный стресс, проявляющийся в серьёзных физиолого-биохимических и морфофункциональных отклонениях.

В естественных водоёмах оксидативный стресс у рыб в основном связывают с антропогенным загрязнением воды токсическими веществами – тяжёлыми металлами, нефтью, фенолом, пестицидами, другими отходами промышленных и бытовых стоков (Руд-

нева, 2000; Грубинко, Леус, 2001; Микряков и др., 2011; Гераскин и др., 2012; Лукина, 2014; Livingstone, 2001, 2003; Ferreira et al., 2005; Song et al., 2006; Mahabub-uz-zaman et al., 2008). Они способствуют увеличению активных форм кислорода, вызывающих ПОЛ. Рядом исследователей показана роль паразитов в подавлении антиоксидантной защиты и развитии окислительного стресса у рыб (Руднева, 2015). Установлена зависимость ПОЛ у рыб от температуры воды, освещённости, солёности, аэрации, от природы токсиканта и времени его воздействия на рыб (Грубинко, Леус, 2001; Силкина и др., 2012; Лукина, 2014; Морозов, 2021).

В аквакультуре причину ПОЛ у рыб видят главным образом в использовании недоброкачественных окисленных кормов. Рыбоводы столкнулись с этой проблемой с первых же попыток массового выращивания рыб на искусственных кормах. Так, у карпов, получавших кормовые смеси, содержащие высушенные куколки тутового шелкопряда с окисленным жиром, возникала болезнь «Секоке» или болезнь «острой спины», заключающаяся в дистрофии и расслоении мышц (Hashimoto et al., 1966; Watanabe, 1982). Подобная патология была отмечена и у сомов. У молоди лососей в результате скармливания не всегда свежих кормовых смесей развивалось патологическое ожирение печени (Факторович, 1960, 1963). Выращивание радужной форели в садках на пастообразных кормах с давно хранившейся мороженой рыбой вызывало жировую дегенерацию печени и анемию, которые удалось предотвратить путем включения в состав рационов фосфатидов (Привольнев и др., 1969). Известно, что фосфатиды, входя в состав липопротеинов крови, активно участвуют в выведении жира из печени и распространении его по организму (Tocher et al., 2008).

При переходе аквакультуры на сухие гранулированные, а затем и экструдированные корма, проблема окисления жира ещё более усложнилась. В состав изготовленных кормов попадают не всегда качественные жиросодержащие ингредиенты, иногда отсутствуют

некоторые экзогенные антиоксиданты (витамины, каротиноиды), нарушаются условия и сроки хранения готовых кормов. При этом повышаются перекисные и кислотные числа липидов, свидетельствующие об окислении кормов.

Несмотря на многочисленные исследования пищевых потребностей рыб разных видов и возраста, разработку рецептуры кормов с добавлением новых ингредиентов и различных антиоксидантов с положительным эффектом, проблема окислительного стресса у выращиваемых рыб остается до сего времени актуальной (Бурлаченко, 2008; Кобылинская и др., 2013; Бахтиярова и др., 2016; Остроумова и др., 2022).

Как у диких, так и культивируемых рыб ПОЛ вызывает патологические физиолого-биохимические и морфофункциональные отклонения, среди которых особого внимания заслуживает состояние жирных кислот (ЖК). С них в первую очередь начинаются изменения при активизации ПОЛ, для которого основным субстратом являются полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК).

Повышенный интерес вызывают липиды печени рыб. Именно в этом органе отмечаются наиболее активные процессы ПОЛ и накопление токсичных продуктов, в том числе у сиговых (Лукина, 2014), у осетровых (Галактионова, Гераскин, 2016), у леща (Морозов, 2021), что авторы объясняют ключевой ролью печени в детоксикации.

Особую значимость приобретает состав ЖК мышечной ткани рыб для определения качества рыбной продукции. В связи с нарастающим дефицитом рыбьего жира проводятся массовые исследования по замене его в составе кормов на растительные масла для рыб разных видов и возраста. Замена рыбьего жира на масла часто не отражается на эффективности рыбоводно-биологических результатах, но изменяет состав ЖК липидов. При этом ухудшается пищевая ценность рыб, так как снижается содержание длинноцепочных полиеновых кислот семейства омега-3 эйкозапентаеновой (ЭПК 20:5n-3) и докозагексае-

новой (ДГК 22:6n-3), важных для здоровья человека (Гладышев, 2021; Turchini et al., 2018; Tocher et al., 2019). Основным источником этих n-3 кислот в нашем питании является рыба. Согласно Всемирной организации здравоохранения для предотвращения сердечно-сосудистых заболеваний суточная норма ЭПК и ДГК составляет 0,5–1,0 г (Гладышев, 2021).

Целью настоящей работы было сравнить жирнокислотный состав липидов печени и мышечной ткани сиговых рыб из естественных водоёмов с разной степенью загрязнённости с ЖК сиговых, выращиваемых в условиях аквакультуры на кормах с разной продолжительностью хранения и с добавкой антиоксидантов в состав рационов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В естественных условиях жирнокислотный состав липидов печени определяли у сигов (*Coregonus lavaretus*) из разных условий нефтяного загрязнения (Лукина, 2014): в контрольном водотоке (условно чистый водоём) и в загрязнённых водах верховья и низовья р. Печоры. Причём валовое содержание нефтепродуктов в природной воде и донных отложениях в низовье характеризовались более высокой степенью загрязнённости, чем в верховье бассейна р. Печоры. Обловы рыбы проводили набором ставных жаберных сетей стандартной длины – 25 м, высотой – 1,5 м и размером ячеи: 10–45 мм, что обеспечивает вылов рыбы длиной от 5 см и более.

В условиях аквакультуры жирнокислотный состав анализировали у сиговых в экспериментах по разработке кормов в 2018, 2019 и 2022 гг. Эксперименты с сиговыми проводили на базе рыбхоза ООО «Форват» в садках, установленных в оз. Суходольское Вуоксинской озёрно-речной системы (Ленинградская обл.).

До опытов рыбу выращивали в производстве на кормах «БиоМар» (Дания). Для проведения опытов рыб рассаживали в садки размером 2,5×2,5×3,0 м – сеголеток по 1000, двухлеток по 150 экз. В процессе экспериментов уход за рыбой и кормление осу-

ществляли по рекомендациям, разработанным ГосНИОРХ (Сборник методических рекомендаций ..., 2012). Периодически проводили контрольные обловы и взвешивания небольших выборок рыб для наблюдения за ростом и для корректировки суточных норм корма.

Опыты с сеголетками пеляди (*Coregonus peled*), получавшими корма с разным сроком хранения – 1,5 и 3,5 мес. (2018 г.) и двухлетками чира (*C. nasus*), получавшими корма, хранившиеся 55 дней (при норме хранения 60 сут.) и опрыскиваемые в последние 10 дней витамином С, обладающим антиоксидантными свойствами (2019 г.), подробно изложены в предыдущих публикациях (Остроумова и др., 2018, 2020). Здесь некоторые данные используются для сравнения ЖК у культивируемых и диких рыб.

В экспериментах 2022 г. двухлетки муксуна (*C. muksun*) получали корма с включением сорбента «СинерджиСорб Детокс-мико». Сорбент, отличающийся высокими сорбционными способностями, был разработан в СООО «СинерджиКом» (Республика Беларусь) на основе гидролизованного лигнина для борьбы в животноводстве с интоксикацией микотоксинами. Сорбент показал способность сдерживать ПОЛ в рыбных кормах и повышать антиоксидантную защиту молоди сиговых, потреблявших эти корма (Остроумова и др., 2022). В настоящей работе исследуется антиокислительная способность сорбента в кормах муксуна старшего возраста (двухлетки): корм №1 – контроль, корма №2 и №3 с включением 1 и 2% сорбента. Для сравнения в эксперименте использовали импортные коммерческие корма фирмы БНБК (Республика Беларусь).

Температурный режим в 2022 г. был неблагоприятным для холодолюбивых рыб из-за повышенной летней температуры, почти два месяца превышающей допустимую для сиговых 20°C. С подъёмом температуры воды выше 20°C суточные нормы корма во всех садках снизили на 50%. Содержание кислорода в воде даже в жаркие месяцы не опускалось

ниже 8,2–9,2 мг/л, что соответствует 91–100% насыщения. Через два месяца при снижении температуры воды количество корма повысили до рекомендуемых суточных норм. Опыты продолжались в течение 155 сут. (с 19 мая по 23 октября).

Анализы жирнокислотного состава липидов выполнены по заказу ГосНИОРХ в ООО «АМТ» («Аналитика, материалы, технология») методом газожидкостной хроматографии. Общее содержание жира определяли по методу Фолча с использованием бинарного растворителя (хлороформ и спирт), витамин С – по методу В.И. Бунина в модификации Л.М. Князевой (1979).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения при перекисном окислении липидов в спектре жирных кислот липидов печени сига в естественных водоёмах в условиях нефтяного загрязнения

Изучали жирнокислотный состав липидов печени сигов, обитающих в условно чистых (контроль) и загрязнённых в разной степени нефтью водоёмах – в меньшей степени в верхнем течении и в большей – в нижнем течении р. Печоры.

В таблице 1 представлены основные жирные кислоты и сумма всех насыщенных, мононенасыщенных и полиненасыщенных ЖК в липидах печени сиговых из естественных водоёмов. Состав кислот имел характерное для пресноводных рыб высокое содержание ПНЖК, причём, в основном, за счёт кислот омега-3 ряда. Как известно, такой набор предопределён водной средой с низкими температурами и обеспечивает необходимый уровень вязкости биомембран (Хочачка, Сомеро, 1977). ПНЖК у рыб из чистого водоёма составляли 55,8%, содержание которых значительно снижались у рыб из верхнего (37,9%) и нижнего (33,4%) течения р. Печоры в связи с повышением ПОЛ. Уменьшение происходило за счёт омега-3 кислот и, особенно, ДГК, которая у рыб в верховье снизилась в 1,9 раза по сравнению с контрольным водоёмом, а в более

загрязнённом низовье – почти в 3 раза. Содержание арахидоновой кислоты (20:4n-6) так же снижалось в зависимости от токсического воздействия (от 7,9% в контроле до 5,1% в верховье и 2,5% в низовье). Аналогичные изменения произошли и в общей сумме полиеновых кислот омега-3 и омега-6, что отразилось на их соотношении. Коэффициент $\omega 3/\omega 6$ снижался по мере увеличения загрязнённости водоёма с 3,9 до 2,8, но при этом сохранялся в пределах нормы – 1–4 для пресноводных рыб (Coweу, 1988).

Обратную картину наблюдали в печени сигов по мононенасыщенным кислотам. Их сумма при загрязнении существенно (в 1,9–2 раза) увеличивалась, в основном за счёт олеиновой кислоты (18:1n-9), которая в печени контрольных рыб составляла 15,3%, а у рыб в загрязнённых участках – 27,5 и 30,3%.

Результаты исследований жирнокислотного состава липидов печени сига из фонового района и зон экологического неблагополучия свидетельствуют о существовании зависимости между содержанием ЖК в тканях печени и степенью загрязнения водоёма.

Сеголетки пеляди в условиях аквакультуры, получавшие корма с разной продолжительностью хранения

Исследование качества липидов в экспериментальных кормах, которое определяли сразу же после их изготовления, показало превышение установленных предельно-допустимых концентраций (ПДК) гидроперекисей – 0,29–0,40 %J₂ при ПДК 0,2% J₂, пероксидов – 0,4–0,7% J₂ при ПДК 0,6%J₂, кислотного числа – 28–40 мг КОН/г при ПДК 50 мг КОН/г (Временная инструкция ..., 1987). Тем не менее, использование таких кормов в течение 3,5 месяцев с момента изготовления не отразилось на рыбоводно-биологических и ряде физиологических показателей сеголеток пеляди, которые были практически одинаковыми на всех рационах. Средняя конечная масса сеголеток колебалась в пределах 11,7–

Таблица. 1. Жирные кислоты липидов печени сигов из контрольного водотока и очагов загрязнения (верховье и низовье р. Печоры), в % от суммы

Жирные кислоты	Контроль	Верховье	Низовье
16:0 (пальмитиновая)	19,1±2,0	15,9±1,9	17,0±2,1
18:0 (стеариновая)	4,2±0,05	3,2±0,5	4,0±0,05
18:1n-9 (олеиновая)	15,3±1,9	27,5±3,2	30,3±3,2
18:2n-6 (линолевая)	2,1±0,2	2,7±1,1	4,0±0,5
20:4n-6 (арахидоновая)	7,9±0,9	5,1±0,06	2,5±1,3
18:3n-3 (α-линоленовая)	1,1±0,1	1,4±0,06	2,5±0,1
20:5n-3 (ЭПК)	9,3±1,0	9,7±1,2	8,6±1,2
22:6n-3 (ДГК)	29,4±4,8	15,3±2,3	9,9±1,2
Насыщенные	24,4	20,0	22,3
Моноеновые	19,8	37,8	40,7
Полиеновые	55,8	37,9	33,4
Σ n-3	44,2	29,1	33,4
Σ n-6	11,3	8,8	8,8
n-3/n-6	3,9	3,3	2,8

11,8 г, суточный прирост – 1,9–2,0%, выживаемость 87–91%. Содержание гемоглобина – 66–75 г/л, индекс печени 1,3–1,4%.

Между тем, анализ жира печени у пеляди, получавшей корма с длительным хранением (3,5 мес.) указывает на начавшиеся существенные изменения в структуре липидов (табл. 2). При накоплении жира за счёт триацилглицеринов резко снизилось количество фосфолипидов (с 42,2 до 16,2%). Существенно изменился и жирнокислотный состав – уменьшилось количество полиненасыщенных омега-3 кислот, причём почти в 2 раза снизилось содержание высоконепредельной ДГК (22:6n-3) (табл. 2). Поскольку содержание омега-6 кислот практически не изменилось, значительно уменьшилось отношение омега-3 к омега-6. При этом отмечено существенное увеличение у рыб мононенасыщенных ЖК, в основном за счёт олеиновой кислоты (18:1n-9), при снижении насыщенных (пальмитиновой и стеариновой). Насыщенные ЖК видимо, послужили источником для образования мононенасыщенных. Содержание арахидоновой кислоты

(20:4n-6) было очень низким (меньше единицы), не зависимо от сроков хранения кормов.

Результаты анализа липидов печени у сеголеток пеляди, получавших корма с истёкшим сроком годности, свидетельствовали об истощении антиоксидантной защиты и преобладании процессов перекисного окисления липидов.

У диких сиговых, обитающих в загрязнённых водоёмах, отмечались подобные же изменения в жирнокислотном составе (см. табл. 1). Снизилось содержание омега-3 кислот, особенно за счёт ДГК, что привело к уменьшению коэффициента n-3/n-6, повысился уровень олеиновой кислоты при уменьшении насыщенных жирных кислот. Но особенностью жирнокислотного состава липидов диких рыб было присутствие в несколько раз больше арахидоновой кислоты, даже в загрязнённых водоёмах, чем у рыб, выращиваемых как на экспериментальных кормах с разной продолжительностью хранения, так и на импортных.

Таблица 2. Характеристика липидов печени сеголеток пеляди, получавших корма с разным сроком хранения

Показатели	Сроки хранения кормов	
	1,5 мес.	3,5 мес.
Липиды		
Содержание липидов, %	5,5±1,3 ^a	9,1±1,0 ^a
фосфолипиды, %	42,2±4,3 ^a	16,2±1,6 ^b
триацилглицерины, %	49,5±3,3 ^a	62,0±4,4 ^a
Жирные кислоты, % от суммы		
16:0 (пальмитиновая)	26,5±0,66 ^a	12,37±0,59 ^b
18:0 (стеариновая)	6,7±0,38 ^a	3,9±0,15 ^b
18:1n-9 (олеиновая)	16,9±0,50 ^a	38,6±2,11 ^b
18:2n-6 (линолевая)	8,0±0,32 ^a	7,0±0,6 ^a
20:4n-6 (арахидоновая)	0,37±0,19 ^a	0,63±0,03 ^a
18:3n-3 (α-линоленовая)	1,3±0,1 ^a	3,37±1,34 ^a
20:5n-3 (ЭПК)	3,8±0,12 ^a	2,97±0,13 ^b
22:6n-3 (ДГК)	22,3±0,45 ^a	11,57±0,75 ^b
Насыщенные	35,7±1,13 ^a	18,33±0,92 ^b
Мононенасыщенные	23,3±0,4 ^a	42,83±0,61 ^b
Полиненасыщенные	37,3±0,51 ^a	29,8±2,7 ^b
Σ n-3	29,1±0,66 ^a	19,97±2,19 ^b
Σ n-6	8,2±0,15 ^a	9,83±0,58 ^a
n-3/n-6	3,6±0,13 ^a	2,03±0,15 ^b

Примечание: Разные буквенные индексы свидетельствуют о достоверности (при $P \leq 0,05$) изменения липидов печени у рыб, получавших корма с истёкшим сроком годности.

Состояние двухлеток чира, получавших в течение 10 дней корма с добавкой витамина С

Добавка витамина С в конце опыта в течение короткого срока (10 сут.) практически не отразилась на рыбоводно-биологических параметрах рыб, получавших экспериментальные корма. Разница по конечной массе чира на контрольном и на опрыскиваемом корме (162 и 169 г) была не достоверна, сходными были суточные приросты (1,4 и 1,5%), кормовые коэффициенты (0,9 и 0,8) индексы печени (1,3 и 1,3), содержание жира в теле (9,8 и 9,6%). Несколько выше был жир печени и мышц у рыб на финском («Райсиоагро» Ройял)

не опрыскиваемом корме (табл. 3). Несмотря на кратковременность добавки витамина С, содержание витамина в печени и мышцах повысилось. В печени на 34%, в мышцах – на 18% и заметно отразилось на структуре жирнокислотного состава мышц чира (табл. 3). Значительно возросло содержание длинноцепочных ЖК в мышцах, особенно ДГК – на 37% и ЭПК – на 17%. Характерно, что это сопровождалось снижением количества моноеновой олеиновой кислоты. У рыб, получавших добавку витамина С, содержание олеиновой кислоты в мышцах снизилось с 34,5 до 26,7%. При этом более чем на 30% в 100 г мышц чира

ИЗМЕНЕНИЯ В СПЕКТРЕ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА

Таблица 3. Общий жир и жирнокислотный состав липидов печени и мышц двухлеток чира, получавших различные корма, в т.ч. с опрыскиванием витамином С

Показатели	Корм (контроль)	Корм 10 сут. добавка витамина С	Ройял	Корм (контроль)	Корм 10 сут. добавка витамина С	Ройял
	Печень			Мышцы		
	Липиды, %					
	5,8	6,6	8,2	9,8	9,6	12,6
	Жирные кислоты, % от суммы					
16:0	16,5	16,7	13,0	14,2	15,8	16,0
18:0	2,7	2,8	3,1	2,9	3,4	3,3
18:1n-9	25,7	25,8	37,7	34,5	26,7	32,3
18:2n-6	7,1	7,0	4,6	10,3	9,6	9,8
20:4n-6	0,9	1,0	0,6	0,3	0,3	0,4
18:3n-3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3
20:5n-3	5,0	5,3	3,2	2,6	3,1	2,9
22:6n-3	24,1	25,0	17,9	15,9	21,8	21,4
Насыщенные	20,2	20,5	17,0	19,3	21,5	20,9
Моноеновые	36,6	36,2	52,8	46,7	38,5	40,6
Полиеновые	42,6	43,3	30,1	33,3	39,3	37,9
Σn-3	31,8	32,8	23,1	21,4	28,0	26,8
Σn-6	10,8	10,5	7,0	11,9	11,3	11,1
n-3/n-6	2,9	3,1	3,3	1,8	2,5	2,4
20:5n-3+22:6n-3	29,1	30,3	21,1	18,5	24,9	24,3
	Длинноцепочные жирные кислоты в 100 г печени и мышц, г					
ЭПК + ДГК	1,7	2,0	1,7	1,8	2,4	3,1

повысилась сумма ДГК и ЭПК, улучшив тем самым качество рыбной продукции. В 100 г рыбы содержалась двойная суточная норма этих незаменимых для здоровья человека омега-3 жирных кислот.

Изменение структуры ЖК у двухлеток чира, получавших контрольный корм, происходило в том же направлении, что и изменение структуры ЖК диких рыб, обитающих в воде с токсическими элементами, что свидетельствовало о развитии ПОЛ. Добавление витамина С повысило антиоксидантную защиту и тем

самым улучшило состав ЖК в мышцах. Содержание арахидоновой кислоты, как и в предыдущих опытах, было в несколько раз ниже, чем у диких рыб, на всех кормах, включая импортный.

Состояние двухлеток муксуна, получавших корма с добавкой лигнинового сорбента

Анализ качества липидов изготовленных кормов с сорбентом показал, что сорбент снижает перекисные числа, но все же они превышают допустимый уровень (табл. 4).

Таблица 4. Качество липидов кормов в начале опыта

№ корма	Особенности состава корма, %	Перекисное число, % J ₂	Кислотное число, мг КОН/г
1	Контроль (без сорбента)	0,41	6,3
2	Сорбент – 1%	0,32	5,6
3	Сорбент – 2%	0,32	5,7
Предельно допустимое содержание *		0,2	50

* **Примечание:** По: Временная инструкция ..., 1987.

Так же как в рационах для сеголеток (Остроумова и др., 2022) сорбент проявил свои антиоксидантные свойства и в кормах для двухлеток сиговых. Повышенное перекисное число липидов в изготовленных кормах (табл. 4) и повышенная температура воды в течение 2 месяцев отрицательно сказались на выживаемости муксуна, которая отразилась на общей выращенной биомассе рыбы в соответствии с количеством сорбента. Выживаемость на корме №2 (1% сорбента) была в 2 раза и на корме №3 (2% сорбента) в 2,6 раза выше контрольной рыбы, не получавшей сорбента. Общая биомасса рыб в конце опыта при этом составила в контроле – 6,3 кг, на корме №2 – 9,9 кг, на корме №3 – 13,7 кг.

Что касается жирнокислотного состава, то состояние окисленности липидов в изготовленных кормах (перекисное число превышало допустимый предел), а так же аномально высокая температура отразилась на ЖК печени и мышечной ткани рыб. По сравнению с результатами предыдущего опыта (2019 г. с опрыскиванием кормов витамином С за 10 сут. до завершения эксперимента), когда рыб выращивали при благоприятной температуре, состав ЖК существенно отличался, несмотря на близкие по рецептуре корма. Так, в липидах печени контрольной рыбы в 2019 г. сумма полиненасыщенных ЖК составляла 42,6%, в то время как у рыб в опытах 2022 г. при аномально высокой температуре была значительно ниже – 28,8% (табл. 5). Причем у первых ДГК составляла 24,1% (см. табл. 3), в

то время как у вторых – только 8,0%. Общее количество омега-3 кислот – соответственно 31,8 и 15,0%. Содержание олеиновой кислоты, как и следовало ожидать, было значительно ниже в первом случае – 25,7%, чем во втором – 40,7%.

В мышечной ткани была та же картина – особенно отметим резкую разницу в ДГК: в 2019 г. – 15,9, в то время как в 2022 г. – только 1,4%. Как уже было показано, опрыскивание корма в течение 10 сут. витамином С, обладающим антиоксидантными свойствами, еще более улучшило структуру липидов, приблизив её к структуре ЖК диких рыб. В рассматриваемых опытах 2022 г. роль антиоксидантной защиты сыграл сорбент. Его введение, особенно в количестве 1%, существенно улучшило структуру ЖК печени и мышц (табл. 5, 6). Повысилось содержание фосфолипидов и снизилось содержание триацилглицеринов, увеличилось количество полиненасыщенных кислот, особенно за счёт омега-3, в том числе ДГК и ЭПК кислот. Снизился уровень мононенасыщенной олеиновой кислоты. И только арахидоновая кислота присутствовала как обычно у культивируемых рыб в минимальных количествах и без чётких изменений по сравнению с контрольными рыбами.

ЖК липидов печени и мышечной ткани муксуна, получавшего белорусский корм БНБК (табл. 5, 6) было близким к жирнокислотному составу липидов рыб на контрольном корме, но отмечено даже ещё более низкое содержание фосфолипидов в мышечной

ИЗМЕНЕНИЯ В СПЕКТРЕ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА

ткани и печени и самое высокое содержание триацилглицеринов, что связано с повышенным количеством общего жира в печени – 9,8 против 6,0–6,7% у рыб на других кормах, при индексе печени – 1,7 против 1,5–1,6. Отмеченные изменения в липидах свидетельствуют о начале жирового перерождения печени. Эти рыбы имели в печени самое низкое содержание ПНЖК за счёт омега-3 кислот и самое высокое количество мононенасыщенных в основном за счёт олеиновой кислоты. Вместе с тем, содержание ДГК в мышцах рыб на белорусском корме было выше, чем в контрольных, а ЭПК даже выше, чем в мышечной ткани рыб, получавших сорбент. В 100 г мышц общее содержание ДГК и ЭПК оказалось примерно одинаковым на кормах №2 и №3 с сорбентом

и на белорусском корме – 0,30–0,34 г, а в контроле – только 0,12 г, т.е. в 2,5–2,8 раза меньше (табл. 6).

Анализ липидов сиговых из естественных водоёмов и выращиваемых в условиях аквакультуры показал сходство в структуре и направленности изменений ЖК, в зависимости от воздействия разных факторов, вызывающих активизацию ПОЛ. Но при этом содержание полиненасыщенных жирных кислот у диких рыб из контрольного условно чистого водоёма было всегда значительно более высоким. Сумма всех полиеновых кислот в печени у сиговых рыб из контрольного водоёма составляла 55,8%, в то время как в разных опытах на лучших вариантах кормов – 36–43%.

Таблица 5. Общий жир, фракционный и жирнокислотный состав липидов печени двухлеток муксуна, получавших корма с сорбентом

Показатели	№1 Контроль	№2 Сорбент 1%	№3 Сорбент 2 %	Корм БНБК (Беларусь)
Липиды,%	6,7	6,5	6,0	9,8
фосфолипиды, %	52,0	53,5	26,0	33,2
триацилглицерины, %	13,0	4,6	1,9	25,9
Жирные кислоты, % от суммы				
16:0	11,9	16,2	11,8	10,7
18:0	2,2	2,6	2,2	2,6
18:1n-9	40,7	29,4	36,6	47,5
18:2n-6	9,8	10,9	8,7	2,0
20:4n-6	0,62	0,61	0,59	0,30
18:3n-3	3,2	3,5	3,2	0,96
20:5n-3	3,0	4,5	3,5	2,7
22:6n-3	8,0	14,6	10,5	7,69
Насыщенные	15,5	20,2	15,7	14,6
Моноеновые	52,6	36,9	48,4	62,6
Полиеновые	28,8	40,2	32,7	17,9
Σ n-3	15,0	23,9	18,1	12,0
Σ n-6	13,8	16,3	15,0	5,9
n-3/n-6	1,1	1,5	1,2	2,0

Таблица 6. Общий жир, фракционный и жирнокислотный состав липидов мышечной ткани двух-леток муксуна, получавших корма с сорбентом

Показатели	Корм №1 Контроль	Корм №2 Сорбент 1%	Корм №3 Сорбент 2%	Корм БНБК (Беларусь)
Липиды, %	5,3	5,4	6,1	5,6
фосфолипиды, %	20,9	41,1	31,8	11,1
триацилглицерины, %	34,0	11,5	32,7	66,4
Жирные кислоты, % от суммы				
16:0	14,3	12,5	12,9	14,5
18:0	2,6	2,9	2,9	2,4
18:1n-9	41,4	37,2	36,0	39,3
18:2n-6	14,7	15,9	13,4	9,0
20:4n-6	0,68	0,28	0,44	0,36
18:3n-3	6,6	8,4	6,4	2,8
20:5n-3	1,0	1,5	1,6	2,4
22:6n-3	1,4	4,3	4,3	3,4
Насыщенные	20,2	17,5	18,3	20,9
Моноеновые	53,0	46,4	47,7	54,7
Полиеновые	24,2	32,8	31,6	21,5
Σ n-3	9,0	14,6	14,0	9,9
Σ n-6	15,6	18,2	17,5	11,6
n-3/n-6	0,58	0,81	0,80	0,85
20:5n-3 + 22:6n-3	2,4	5,8	5,9	5,9
Длинноцепочные жирные кислот в 100 г мышечной ткани, г				
ЭПК + ДГК	0,12	0,30	0,34	0,33

При активизации перекисного окисления количество легко окисляющихся полиненасыщенных жирных кислот снижалось, особенно за счёт длинноцепочной докозагексаеновой кислоты (ДГК 22:6n-3) – самой ненасыщенной и самой активной из ПНЖК (Шульман, Юнева, 1990). По мере увеличения загрязнения водоёмов в печени сигов ДГК уменьшалась в 2 и 3 раза. Аналогично этому (в 1,7–2,3 раза) снижалось содержание ДГК в печени сиговых при использовании кормов, сроки хранения которых были сильно превышены (почти в 2 раза). В меньшей степени содержание ДГК уменьшалось при небольшом (меньше месяца) нарушении срока хранения. В этом случае даже кратковременное (10 сут.) опрыскивание

кормов раствором витамина С, являющегося антиоксидантом, повысило ДГК в 1,4 раза по сравнению с контролем. В опытах 2022 г. при аномально высокой температуре и при низком качестве липидов изготовленных кормов у сиговых, выращиваемых на кормах с включением 1% сорбента, обладающего антиоксидантными свойствами, удалось повысить ДГК в печени в 1,8 и в мышцах – в 3 раза против контрольного варианта.

Следует особенно отметить, что все определения ЖК у культивируемых рыб, включая контрольные, проводили при завершении опытов в октябре-ноябре, когда при низких температурах (около 6–8°C) степень ненасыщенности жирных кислот должна была увели-

чиваться для поддержания необходимой вязкости мембран в этих условиях (Сущик, 2008; Watanabe, 1982). Между тем, увеличение происходило только при включении в состав кормов антиоксидантов.

Положительное влияние введения антиоксидантов в корма лишней раз указывает на то, что снижение полиеновых кислот у рыб вызвано активизацией ПОЛ и превышением его над антиокислительной защитой. Улучшение ЖК за счёт увеличения ДГК и ЭПК при опрыскивании витамином С происходило начиная с мышц, в печени их содержание практически не изменилось. Ухудшение же ЖК состава на просроченных кормах было существенным в печени, которая аккумулирует токсические продукты, где они подвергаются детоксикации.

В опытах с радужной форелью замечено, что ПНЖК липидов кормов усваиваются лучше других кислот и накапливаются в мышцах (Васильева и др., 2023). Из результатов, полученных этими авторами видно, что ПНЖК омега-3 в не меньшем количестве откладываются и во внутреннем жире форели.

Во всех случаях как у рыб из естественных водоёмов, так и в аквакультуре, при снижении ПНЖК значительно повышалось содержание мононенасыщенных жирных кислот, главным образом за счёт олеиновой кислоты (18:1n-9), которая компенсирует недостаток полиеновых кислот и обеспечивает тем самым проницаемость мембран клеток. Известно, что олеиновая кислота является преобладающей в триацилглицеринах рыб (Ржавская, 1976) и что её увеличение в резервных жирах происходит при дефиците ПНЖК (Watanabe, 1982), что отражает адаптационные процессы в организме рыб при активизации ПОЛ. Увеличение мононенасыщенных жирных кислот при снижении ПНЖК подтверждают и современные исследования (Лукина, 2014; Биндюков и др., 2022; Остроумова и др., 2022).

Отмеченные изменения в структуре ЖК у рыб в аквакультуре происходили на фоне нор-

мального общего физиологического состояния, что свидетельствует о начальной стадии окислительных процессов в организме рыб. Торможению ПОЛ способствовал и состав кормов, в который входили экзогенные антиоксиданты (витамины А, Е, С). Известно, что кратковременное использование окисленных кормов не вызывает немедленной гибели рыб из-за возможности мобилизовать антиоксидантную защиту. Состояние ПНЖК у рыб в аквакультуре может служить показателем начальных стадий ПОЛ и необходимости предпринимать срочные меры по переходу на свежие корма.

В отличие от рыб из естественных водоёмов у культивируемых на искусственных кормах сиговых содержание арахидоновой кислоты (20:4n-6) было минимальным (ниже 1%) на всех кормах, включая импортные. У рыб из естественной среды обитания в экологически благополучном водоёме арахидоновая кислота в липидах печени составляла 7,9%, а у рыб из загрязнённых участков р. Печоры – 5,1 и 2,5%. То есть даже при нефтяном загрязнении водоёмов арахидоновой кислоты у сиговых рыб было в несколько раз больше, чем у культивируемых. Арахидоновая кислота является проблемой аквакультуры, о чём неоднократно сообщалось в литературе. Отмечено её значительно более низкое содержание у заводской молоди (0,49%) и двухлеток пестряток (0,44%), получавших датский корм BioMar Inicio 901 и 917, по сравнению с дикой молодью и пестрятками лосося (2,13 и 2,93%) (Нефедова и др., 2020); в мышечной ткани у заводской щуки (*Esox lucius*) старшего возраста – 0,73% против 8,6% у щуки из водоёма (Jankowska et al., 2008); у лаврака (*Dicentrarchus labrax*) из двух рыбхозов 0,33 и 0,48 при 5,37% из естественных условий (Fuentes et al., 2010); в 2,4 и в 4,6 раза ниже в печени самок и самцов культивируемой сенегальской камбалы (*Solea senegalensis*), по сравнению с дикими производителями (Norambuena et al., 2012); в икре заводского муксуна 0,62% против 2,58% в икре дикого муксуна (Лютиков и др., 2022).

Таблица 7. Сравнение лучших вариантов жирнокислотного состава печени у сиговых рыб из водоёмов (сиг) и в условиях аквакультуры (пелядь, чир, муксун)

Показатели ЖК	Чистый водоём	Хранение кормов 1,5 мес.	Опрыскивание витамином С	Сорбент 1%	Ройял	БНБК
Моноеновые	19,8	23,3	36,2	36,9	52,8	62,6
18:1-n9	15,3	16,9	25,8	29,4	37,7	47,5
Полиеновые	55,8	37,3	43,3	40,2	30,1	17,9
Σ n-3	41,2	29,1	32,8	23,9	23,1	12,0
Σ n-6	11,5	8,2	10,5	16,3	7,0	5,9
ЭПК	9,3	3,8	5,3	4,5	3,2	2,7
ДГК	29,4	22,3	25,0	14,6	17,9	7,7

Такое положение связано с очень низким содержанием арахидоновой кислоты в обычных компонентах, используемых для изготовления кормов. Между тем, в биологии известна активная роль арахидоновой кислоты в репродуктивных процессах, в эмбриональном развитии организмов. Отмечено повышенное содержание арахидоновой кислоты в фосфолипидах куриного желтка – 5% (Radünz-Neto et al., 1994). Но и в желтке куриных яиц её содержание сильно колеблется по данным разных авторов: в пересчёте на липиды сухой массы желтка – от 0,4 (Мезенцев, 2015) до 6,0% (Shevchenko et al., 2020), что может быть связано с особенностью питания кур на птицефермах. Приведённые данные свидетельствуют о важности поисков увеличения арахидоновой кислоты в тканях, выращиваемых в аквакультуре рыб.

В мышцах рыб хорошие результаты по содержанию ЖК получены у выращиваемого муксуна, которому давали в течение последних 10 сут. перед завершением опыта корм, опрыскиваемый раствором витамина С, обладающего антиоксидантными свойствами. У этих рыб в 100 г мышечной ткани содержалось 2,4 г длинноцепочных ПНЖК – докозагексаеновой и эйкозапентаеновой кислот, т.е. в 2 раза больше суточной нормы для человека, установленного ВОЗ. Но содержание арахидоновой кислоты, как и у всех других

рыб из опытов, включая рыб, выращенных на импортных кормах, было минимальным.

В таблице 7 приводятся данные жирнокислотного состава печени рыб из чистого водоёма и из садков, где удалось снизить ПОЛ путём нормализации сроков хранения и добавки антиоксидантов (витамина С и сорбента), и, таким образом, несколько улучшить состав ЖК, приблизив его к таковому из чистого водоёма.

Наибольшее количество полиеновых жирных кислот в печени отмечено у сигов *C. lavaretus* из естественного чистого водоёма за счёт высокого содержания омега-3 кислот и ДГК. Наименьшее содержание полиненасыщенных кислот оказалось в печени муксуна, получавших корма из БНБК (Республика Беларусь) за счёт самого низкого содержания омега-3 кислот и ДГК. Липиды этих рыб содержали значительно больше моноеновых кислот, чем у всех других рыб, в основном за счёт олеиновой кислоты. Липиды печени сиговых рыб, выращенных на опытных кормах, как и на финских кормах, по содержанию различных жирных кислот занимали среднюю позицию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены наиболее часто изучаемые факторы, вызывающие оксидативный стресс у диких и разводимых рыб. В естественной среде – загрязнение воды,

в аквакультуре – окисленные жиры кормов. Вместе с тем, в естественных условиях значительную роль в оксидативном стрессе рыб может играть и окисленная пища. Кормовые организмы находятся в той же загрязнённой среде и также под влиянием ПОЛ теряют витамины, каротиноиды, лишая рыб возможности получить необходимое количество экзогенных антиоксидантов. Например, при потреблении моллюсков, окислительный стресс которых исследуется в качестве биомаркера оценки состояния водной среды (Чуйко, Холмогорова, 2022). В аквакультуре – так же окислительный стресс у рыб могут вызывать не только окисленные корма, но и загрязненная токсическими веществами среда обитания (сбросы предприятий и другие стоки), ухудшение состава воды при уплотнённых посадках рыб, аномально высокая температура, что необходимо учитывать при оценке результатов исследований.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности улучшения искусственных кормов, в том числе и путём сдерживания перекисного окисления липидов, и приближения, таким образом, качества рыболовной продукции (в т.ч. гастрономического), полученной в аквакультуре к качеству рыб из естественных не загрязнённых водоёмов. ПНЖК могут служить показателем интенсивности перекисных процессов в организме рыб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахтиярова Ш.К., Джусипбекова Б.А., Жаксымов Б.И. и др.* Процессы перекисного окисления липидов у осетровых рыб при кормлении различными кормами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 5. С. 595–597.
- Биндюков С.В., Бурлаченко И.В., Баскакова Ю.А. и др.* Опыт замены рыбьего жира растительными маслами в комбикормах для радужной форели // Труды ВНИРО. 2022. Т. 187. С. 138–148. Doi.org/10.36038/2307-3497-2022-187-138-148.
- Бурлаченко И.В.* Актуальные вопросы безопасности комбикормов в аквакультуре рыб. М.: ВНИРО, 2008. 183 с.
- Васильева О.Б., Назарова М.А., Немова Н.Н.* Ассимиляция экзогенных жирных кислот в тканях радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) в аквакультуре // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2023. № 1. С. 98–104. Doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-98-104.
- Временная инструкция по определению степени окисления липидов в кормах и оценке влияния качества кормов на рыб / Картавцева Н.Е., Абрамова Ж.И., Остроумова И.Н., Шабалина А.А. Л.: ГосНИОРХ. 1987. 28 с.*
- Галактионова М.Л., Гераскин П.П.* Особенности перекисного окисления липидов в печени и мышцах разных видов осетровых рыб // Морские биологические исследования: достижения и перспективы. Матер. Всерос. науч.-практич. конф. с междунар. участием. приуроченной к 145-летию Севастопольской биологич. станции, 2016. С. 389–392.
- Гераскин П.П., Пономарёва Е.Н., Металлов Г.Ф., Галактионова М.Л.* Нефтяное загрязнение Каспийского моря как один из факторов инициирования оксидативного стресса у осетровых рыб // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 1. С. 2658–2665.
- Гладышев М.И.* Наземные источники полиненасыщенных жирных кислот для аквакультуры // Вопр. ихтиологии. 2021. Т. 61. № 4. С. 471–485. Doi:10.31857/S0042875221030048.
- Грубинко В.В., Леус Ю.В.* Перекисное окисление липидов и антиоксидантная защита у рыб (обзор) // Гидробиологический журнал. 2001. Т. 37. №1. С. 64–78.
- Князева Л.М.* Рекомендации по увеличению сроков хранения гранулированного корма для молоди форели путём опрыскивания его водным раствором витамина С. Л.: ГосНИОРХ. 1979. 12 с.
- Кобылинская А.Д., Сахаров А.В., Макеев А.А. и др.* Роль свободнорадикального перекисного окисления липидов в механизме развития жировой дистрофии печени рыб при выращивании на искусственных кормах // Вестник КрасГАУ. 2013. № 3. С. 123–128.

Лукина Ю.Н. Проблемы здоровья рыб в водных экосистемах Европейско-Сибирской области палеарктики: Автореферат дис. ... докт. биол. наук. Петрозаводск, 2014. 37 с.

Лютиков А.А. Сравнительная характеристика размерно-массовых показателей и липидного состава дикой и заводской икры муксуна *Coregonus muksun* (Pallas, 1814) // Сибирский экологический журнал. 2022. № 1. С. 100–110. DOI 10.15372/SEJ20220109.

Мезенцев С.В. Изменение состава жирных кислот пищевых куриных яиц при хранении // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 10 (132). С. 99–104.

Микряков В.Р., Силкина Н.И., Микряков Д.В. Влияние антропогенного загрязнения на иммунологические и биохимические механизмы поддержания гомеостаза у рыб Чёрного моря // Биология моря. 2011. Т. 37. № 2. С. 141–147.

Морозов А.А. Реакция антиоксидантной системы пресноводных костистых рыб Рыбинского водохранилища на действие природных и антропогенных факторов: Автореферат дис. ... канд. биол. наук. Пенза, 2021. 22 с.

Нефёдова З.А., Мурзина С.А., Пеккоева С.Н. и др. Сравнительная характеристика жирнокислотного состава липидов заводской и дикой молоди атлантического лосося *Salmo salar* L. // Сибирский экологический журнал. 2020. № 2. С. 197–204. DOI 10.15372/SEJ20200205.

Остроумова И.Н., Шумилина А.К., Лютиков А.А. Влияние длительности хранения кормов на фракционный и жирнокислотный состав липидов печени сиговых // Вестник рыбохозяйственной науки. 2018. Т. 5. № 3 (19). С. 60–67.

Остроумова И.Н., Костюничев В.В., Лютиков А.А. и др. Влияние витамина С на жирнокислотный состав печени и мышц двухлеток сиговых рыб (*Coregonidae*), выращиваемых в условиях аквакультуры // Вопр. рыболовства. 2020. Т. 21. №3. С. 343–352. DOI:10.36038/0234-2774-2020-21-343-352.

Остроумова И.Н., Лютиков А.А., Шумилина А.К., Вылка М.М. Влияние модифицированного гидролизного лигнина на перекисное

окисление липидов в рыбных кормах и на выращиваемых на них рыб // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2022. № 8. С. 560–572. DOI 10.33920/sel-09-2208-06.

Привольнев Т.И., Стрельцова С.В., Бризинова П.Н. и др. Ускорение роста радужной форели и предохранение её от цероидной дегенерации печени введением в кормовые смеси фосфатидов // Изв. ГосНИОРХ. 1969. Т. 68. С. 23–35.

Ржавская Ф.М. Жиры рыб и морских млекопитающих. М.: Пищевая промышленность, 1976. 470 с.

Руднева И.И. Ответные реакции морских животных на антропогенное загрязнение Чёрного моря: Автореферат дис. ... докт. биол. наук. Москва. 2000, 55 с.

Руднева И.И. Окислительный стресс и патологии рыб. Проблемы патологии, иммунологии и охраны здоровья рыб и других гидробионтов // Расширенные материалы. IV Международной конференции. Борок – Москва, 2015. С. 112–120.

Сборник методических рекомендаций по индустриальному выращиванию сиговых рыб для целей воспроизводства и товарной аквакультуры / Под общей редакцией А.К.Шумилиной. Санкт-Петербург. ГосНИОРХ, 2012. 288 с.

Силкина Н.И., Микряков Д.В., Микряков В.Р. Влияние антропогенного загрязнения на окислительные процессы в печени рыб Рыбинского водохранилища // Экология. 2012. № 5. С. 361–365.

Сущик Н.Н. Роль незаменимых жирных кислот в трофометаболических взаимодействиях в пресноводных экосистемах (обзор) // Журн. общей биологии. 2008. Т. 69. № 4. С. 299–316.

Факторович К.А. Опыт оценки некоторых диет, применяющихся для молоди балтийского лосося, по данным гистофизиологического анализа печени // Матер. совещания по вопросам рыбоводства. М., 1960. С. 103–112.

Факторович К.А. Пищевые потребности лососевых и основные корма, применяемые в лососеводстве // Изв. ГосНИОРХ. 1963. Т. 54. С. 64–89.

- Хочачка П., Сомеро Д. Стратегия биохимической адаптации. М.: Мир, 1977. 398 с.
- Чуйко Г.М., Холмогорова Н.В. Сравнительный анализ показателей состояния окислительного стресса у пресноводных двустворчатых моллюсков семейств Dreissenidae и Unionidae // II Международная научно-практическая конференция «Изучение водных и наземных экосистем: история и современность», 5–9 сентября 2022 г., Севастополь, Российская Федерация, С. 196–197.
- Шульман Г.Е., Юнева Т.В. Роль докозагексаеновой кислоты в адаптации рыб // Гидробиологический журнал. 1990. Т. 26. № 4. С. 43–51.
- Cowey C.B. The nutrition of fish: The developing scene // Nutrition Res. Rev. 1988. V. 1. P. 255–280.
- Ferreira M., Moradas-Ferreira P., Reis-Henriques M.A. Oxidative stress biomarkers in two resident species, mullet (*Mugil cephalus*) and flounder (*Platichthys flesus*), from a polluted site in River Douro Estuary. Portugal // Aquat Toxicol. 2005. V. 71. P. 39–48.
- Fuentes A., Fernández-Segovia I., Serra J. A., Barat J.M. Comparison of wild and cultured sea bass (*Dicentrarchus labrax*) quality // Food Chemistry. 2010. V. 119. P. 1514–1518.
- Hashimoto Y., Okaichi T., Watanabe T., Furukawa A. Muscular dystrophy of carp due to oxidized oil and the preventive effect of vitamin E // Bull. Japan. Soc. scient. Fish. 1966. V. 32. P. 64–69.
- Jankowska B., Zakęs Z., Żmijewski T., Szczepkowski M. Fatty acid composition of wild and cultured northern pike (*Esox lucius*) // J. Appl. Ichthyol. 2008. V. 24. P. 196–201.
- Livingstone D.R. Contaminant reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms // Mar. Pollut. Bull. 2001. V. 42. P. 656–666.
- Livingstone D.R. Oxidative stress in aquatic organisms in relation to pollution and aquaculture // Rev. Med. Vet. 2003. V. 154. P. 427–430.
- Mahabub-uz-zaman M., Sarker S.R., Hossain M.S. The effects of industrial effluent discharge on lipid peroxide levels of punti fish (*Puntius sophore*) tissue in comparison with those of freshwater fish // J. Food Lipids. 2008. V. 15. P. 198–208.
- Noramabuena F., Estevez A., Bell G. et al. Proximate and fatty acid compositions in muscle, liver and gonads of wild versus cultured broodstock of Senegalese sole (*Solea senegalensis*) // Aquaculture. 2012. V. 356. P. 176–185.
- Radünz-Neto J., Corraze G., Charlon N., Bergot P. Lipid supplementation of casein-ased purified diets for carp (*Cyprinus carpio* L.) larvae // Aquaculture. 1994. V. 128. P. 153–161.
- Shevchenko I.V., Davydovych V.A., Ushkalov V.O. et al. The effect astaxanthin and lycopene on the content of fatty acids in chicken egg yolks // Regulatory Mechanisms in Biosystems. 2020. V. 11 (4). P. 568–571. Doi:10.15421/022088.
- Song S.B., Xu Y., Zhou B.S. Effects of hexachlorobenzene on antioxidant status of liver and brain of common carp (*Cyprinus Carpio*) // Chemosphere. 2006. V. 65. P. 699–706.
- Tocher D.R., Bendiksen E.A., Campbell E.A., Bell J.G. The role of phospholipids in nutrition and metabolism of teleost fish // Aquaculture. 2008. V. 280. P. 21–34.
- Tocher D.R., Betancor M. B., Sprague M. et al. Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids. EPA and DHA: bridging the gap between supply and demand // Nutrients. 2019. V. 11. P. 89. Doi:10.3390/nu11010089.
- Turchini G.M., Francis D.S., Keast R.S.J., Sinclair A.J. Transforming salmonid aquaculture from a consumer to a producer of long chain omega-3 fatty acids. // Food Chem. 2011. V. 124. P. 609–614.
- Turchini G.M., Hermon K.M., Francis D.S. Fatty acids and beyond: Fillet nutritional characterisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed different dietary oil sources // Aquaculture. 2018. V. 491. P. 391–397. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.11.056>
- Watanabe T. Lipid nutrition in fish // Comp. Biochem. Physiol. 1982. V. 73 B. №1. P. 3–15.

**CHANGES IN THE SPECTRUM OF FATTY ACID COMPOSITION
IN WHITE FISH (COREGONIDAE) FROM
OF NATURAL WATER BODIES AND AQUACULTURE
WITH PEROXIDE LIPID OXIDATION**

© 2024 г. I. N. Ostroumova, Yu. N. Lukina, A. A. Lyutikov, A. K. Shumilina

*Saint Petersburg branch of the Russian Federal Research Institute
of Fisheries and oceanography, Russia, Saint Petersburg, 199053*

A comparison was made of the fatty acid composition of whitefish lipids from water bodies of varying degrees of pollution and those grown on artificial feed in aquaculture. The increase in oil pollution led to an increase in lipid oxidation products and the depletion of antioxidants in the body of fish, which caused a structural rearrangement of fatty acids in a negative direction. In aquaculture, similar changes occurred in fish that consumed food with an extended shelf life. The introduction of vitamin C and a sorbent with antioxidant properties into the composition of diets improved the antioxidant system and the composition of fatty acids. The greatest changes during oxidation occurred in polyunsaturated fatty acids. In fish from a clean reservoir, their content was significantly higher (55,8%) than in fish fed fresh food (36,0–38%) and diets with the addition of antioxidants (40,0–43,4%). In polluted waters, their number decreased to 37,9 and 33,4%, and on expired feed to 24,4 – 32,6%, and in individuals that did not receive antioxidants, to 28,8–42,7%. Changes occurred mainly due to decosahexaenoic acid. A feature of the fatty acid composition of wild fish is the high content of arachidonic acid – 7,9% from a clean reservoir and 5,1 and 2,5% from polluted areas. In cultivated fish, its content did not exceed one.

Keyword: Whitefish, lipid peroxidation, natural water pollution, aquaculture, oxidized feed, polyunsaturated fatty acids, monounsaturated fatty acids, omega-3 acids.