

УДК 577.115.3:595.383.1(261)

СОДЕРЖАНИЕ ЖИРНЫХ КИСЛОТ И ИНДЕКСЫ “КАЧЕСТВА ЛИПИДОВ” У АНТАРКТИЧЕСКОГО КРИЛЯ *EUPHAUSIA SUPERBA* ИЗ ТРЕХ РАЙОНОВ АТЛАНТИЧЕСКОГО СЕКТОРА АНТАРКТИКИ

© 2024 г. С. А. Мурзина^{1, *}, В. П. Воронин¹, Д. Г. Битютский^{1, 2},
академик РАН Н. Н. Немова¹

Поступило 15.07.2024 г.

После доработки 11.08.2024 г.

Принято к публикации 17.08.2024 г.

Исследовано содержание общих липидов и жирных кислот в тканях и сегментах тела взрослых особей антарктического криля, отловленных в трех, различающихся по экологическим условиям, районах Атлантического сектора Антарктики. Показаны достоверные отличия тканей и сегментов тела антарктического криля исследуемых регионов по липидному и жирнокислотному статусу. Анализ основных метаболических индексов качества липидов *E. superba* свидетельствует о его высокой пищевой ценности, в том числе, благодаря высокой ненасыщенности его липидов, благоприятных для здоровья человека соотношений физиологически значимых и эссенциальных жирных кислот, что можно рассматривать как отличительную биохимическую характеристику этого вида. Результаты исследования могут быть использованы для формирования научно-обоснованного подхода к дальнейшей технологической обработке криля-сырца и для целевого извлечения отдельных веществ и компонентов липидной природы.

Ключевые слова: биохимический состав, жирные кислоты, антарктический криль, Антарктика

DOI: 10.31857/S2686738924060083

ВВЕДЕНИЕ

Антарктический криль (*Euphausia superba* Dana, 1850) — один из наиболее массовых морских видов отряда Euphausiacea, являющийся важным объектом питания широкого круга организмов низкоширотной морской экосистемы. Криль не только играет важную роль в функционировании экосистем Антарктики и ее пищевой сети [1], но также является частью разнообразных зоопланктонных сообществ: северного океанического с доминирующими видами *Salpa thompson* и *Themisto gaudichaudii*, основного океанического — с веслоногими, *Thysanoessa macrura*

и неритического — *Euphausia crystallorophias* и антарктической серебрянкой *Pleuragramma antarctica* [2]. В связи с важным значением антарктического криля для морской экосистемы Антарктики ее иногда называют “криль-центричной”. Основные скопления антарктического криля отмечаются в Антарктической части Атлантики (АчА). Благодаря своим огромным запасам и высокой биологической ценности, криль продолжает оставаться одним из важных ресурсов мирового рыболовства [3, 4]. Несмотря на отсутствие промысла этого вида Российской Федерацией (РФ) в последнее десятилетие, антарктический криль остается перспективным объектом промысла в Антарктике для РФ. Лидером промысла антарктического криля является Норвегия, на эту страну за последние десятилетие приходилось от 56 до 71 % всех уловов. Второе место делят между собой Китай (13–25 %) и Республика Корея (8–20 %) (рис. 1).

Следует отметить, что антарктический криль, как правило, рассматривается как объект биотехнологии в ограниченном аспекте (источник белка, каротиноидов и нескольких незаменимых жирных кислот), однако его потенциальная ценность

¹Институт биологии — обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Федерального исследовательского центра
“Карельский научный центр Российской академии наук”,
Петрозаводск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ “ВНИРО”),
Москва, Россия

*e-mail: murzina.svetlana@gmail.com

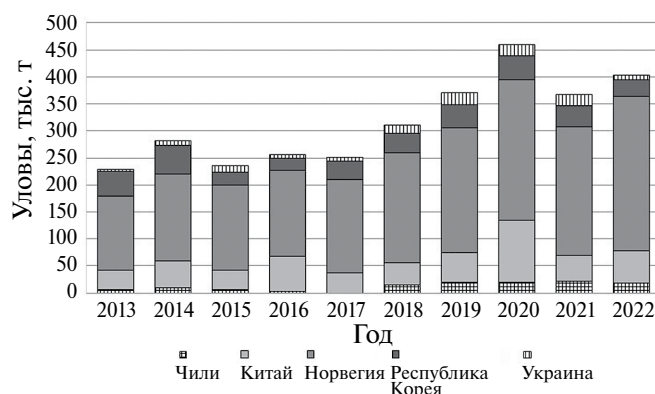


Рис. 1. Промысел антарктического криля в АЧА по странам 2013–2022 гг. согласно данным ФАО (FAO, 2024 [5])

и многовекторность использования как важного природного сырья требуют дополнительных исследований по биохимической характеристике этих видов с целью расширения возможностей их использования. Эти сведения могут иметь значение для развития одного из важных биотехнологических направлений – “морского биопроспектинга”, связанного с целевым использованием морских биоресурсов, основанном на фундаментальных знаниях о структуре, количественном и качественном составе биологически активных макромолекул у гидробионтов.

В рамках настоящего исследования представлены первые данные о содержании жирных кислот в сегментах тела взрослых особей криля – третьем абдоминальном членике, хвосте, а также в гепатопанкреасе, отловленных в январе 2022 года в проливе Брансфилда и Антарктик, а также бассейне Пауэлла моря Уэдделла, вблизи о-вов Джеймса Росса и Шишкова Атлантического сектора Антарктики. Впервые представлена современная оценка пищевой ценности и функциональной значимости для здоровья человека антарктического криля, основанная на анализе набора ключевых метаболических индексов липидного обмена. Результаты исследования могут быть использованы для формирования научно-обоснованного подхода дальнейшей технологической обработки криля-сырца (при получении крилевого масла, муки и др.) и для целевого извлечения отдельных веществ и компонентов липидной природы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отлов антарктического криля проводили в западном секторе АЧА (районы проливов Брансфилда и Антарктик, бассейне Пауэлла моря Уэдделла, вблизи о-вов Джеймса Росса и Шишкова) [6] в рамках 87-го рейса НИС “Академик

Мстислав Келдыш” (АМК-87) в период с 22 января по 12 февраля 2022 г. Материал был получен из ловов двойной квадратной сетью (ДКС) и разноглубинного трала Айзекса-Кидда в модификации Самышева-Асеева (РТАКСА). ДКС имел входное отверстие площадью 1 м² и фильтрующий конус длиной 6 м из газа с размером ячейки 0.5 мм [7]. РТАКСА, не замыкающееся орудие лова с площадью устья 6 м², длиной сетной части 25 м из безузловой дели с ячейей 6 мм и вставкой в кутце из капронового сита № 15 (0.67 мм) [8]. Весь исследуемый антарктический криль был получен с глубин 100–300 м, при скорости движения судна от 2 до 3.3 узлов. Полученный криль незамедлительно транспортировался в лабораторию для дальнейшего анализа.

Препарирование свежельовленных особей и получение отдельных образцов гепатопанкреаса, третьего и хвостового сегмента тела (мышечная ткань) осуществляли на хладагенте в холодной комнате. Образцы до момента доставки в лабораторию сохранялись при температуре –80°С. Далее, проводилась гомогенизация в системе хлороформ: метанол (2:1, по объему). Экстракцию общих липидов (ОЛ) из отобранных образцов проводили по методу Фолча [9]. Качественный и количественный анализ жирных кислот (ЖК) ОЛ проводили методом газовой хроматографии (ГХ), сопряженной с масс-селективным (ГХ-МС) и пламенно-ионизационным (ГХ-ПИД) детектором. Для определения качественного состава полученной смеси метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) проводили их разделение на ГХ с моноквадропольным масс-селективным детектором “Маэстро-αМС” (“Сайтегра”, Россия), где в качестве подвижной фазы использовался гелий, а неподвижной – (88% цианопропил)арил-полисилоксан (хроматографическая колонка HP-88, “Agilent”, США). Полученные данные анализировали с использованием ПО “Маэстро Аналитик v. 1.025” и библиотекой NIST. Количественный анализ осуществляли на ГХ-ПИД “Хроматэк-Кристалл-5000.2” (“Хроматэк”, Россия) при идентичных условиях, однако с использованием азота в качестве подвижной фазы. Обработку полученных результатов проводили в ПО “Хроматэк-Аналитик v. 3.0.298.1”.

На основе полученных ЖК-профилей тканей и сегментов тела криля для определения пищевой и биотехнологической значимости этого вида рассчитаны следующие индексы:

Индекс атерогенности (IA):

$$IA = \frac{[12:0 + (4 \times 14:0) + 16:0]}{(n - 3 \text{ ПНЖК} + n - 6 \text{ ПНЖК} + \text{МНЖК})}$$

где 12:0 – лауриновая кислота, 14:0 – миристиновая кислота, 16:0 – пальмитиновая кислота, n-3 и n-6 ПНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты

“омега-3” и “омега-6” семейств, МНЖК – мононенасыщенные жирные кислоты

Качество липидов рыбы/мяса (FLQ):

$$FLQ = \frac{cis20:5(n-3) + cis22:6(n-3)}{\sum ЖК} \times 100$$

где $cis20:5(n-3)$ – эйкозапентаеновая кислота, $cis22:6(n-3)$ – докозагексаеновая кислота, $\sum ЖК$ – сумма всех жирных кислот

Гипо- и гиперхолестеринемия (НН):

$$НН = \frac{cis18:1 + \sum ПНЖК}{12:0 + 14:0 + 16:0}$$

где $cis18:1$ – мононенасыщенные жирные кислоты с 18 атомами углерода, $\sum ПНЖК$ – сумма всех полиненасыщенных жирных кислот, 12:0 – лауриновая кислота, 14:0 – миристиновая кислота, 16:0 – пальмитиновая кислота

Индекс укрепления здоровья (НПИ):

$$НПИ = \frac{\sum UFA}{12:0 + (4 \times 14:0) + 16:0}$$

где $\sum UFA$ – сумма всех ненасыщенных жирных кислот, 12:0 – лауриновая кислота, 14:0 – миристиновая кислота, 16:0 – пальмитиновая кислота.

Исследования выполнены на базе лаборатории экологической биохимии и с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ “Карельский научный центр Российской академии наук”.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием языка программирования “R” (версия 4.4.1.) в среде разработки “RStudio” (<https://www.posit.co>) с применением дополнительных пакетов: “readxl” (версия 1.4.3.), “tidyverse” (версия 2.0.0.), “vegan” (версия 2.6–6.1) [10]. Для описания количественного содержания ОЛ и индивидуальных ЖК в сегментах тела криля были рассчитаны параметры описательной статистики – среднее арифметическое и его ошибка, дисперсия, распределение выборки. Достоверность различий ($p\text{-value} \leq 0.05$) оценивали с помощью попарного сравнения выборок непараметрическим тестом Вилкоксона–Манна–Уитни. Ординацию районов отлова антарктического криля в многомерном пространстве признаков ЖК профиля для гепатопанкреаса, третьего и хвостового сегмента тела проводили с применением алгоритма неметрического многомерного шкалирования (NMDS). Для определения наилучшей метрики расстояний между исходной и моделируемой матрицами дистанций использовали коэффициент корреляции Спирмена, а оценку меры

расхождений между матрицами осуществляли при помощи показателя “Стресс” [11]. Оценку влияния абиотических факторов среды (температура, соленость, концентрация кислорода и хлорофилла а) на содержание индивидуальных ЖК в разных сегментах тела криля из разных районов вылова проводили с применением канонического анализа соответствий (ССА) [11]. Выявление наилучшей метрики расстояний осуществляли также по коэффициенту Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что липиды, среди биохимических компонентов криля, характеризуются наибольшей изменчивостью и зависят от размера криля, стадии зрелости, его возраста, пола, а также от сезона, экологических условий района обитания [12, 13].

Достоверно высокое содержание ОЛ (по сравнению с особями других районов) показано для криля в бассейне Пауэлла моря Уэдделла, вблизи о-вов Джеймса Росса и Шишкова: гепатопанкреас – 24.2% сухого вещества, хвостовой и третий абдоминальный сегмент – 16.9% и 16.6% (табл. 1). Количество ОЛ у криля из пролива Брансфилд и пролива Антарктик составило: гепатопанкреас – 9.87% и 8.74%, третий абдоминальный сегмент – 6.79% и 6.39%, хвостовой сегмент – 6.64% и 9.44% соответственно. Отмечено, что высокому содержанию липидов соответствует их меньшая ненасыщенность и напротив меньше содержание липидов отличается высоким содержанием ПНЖК. Так, в порядке убывания (по количеству) ЖК-профиль исследованных тканей и сегментов тела криля в бассейне Пауэлла моря Уэдделла, вблизи о-вов Джеймса Росса и Шишкова представлен: НЖК от 43% до 44.65% от суммы ЖК, ПНЖК от 29.71% до 31.0%, где доминируют (n-3)ПНЖК – 28.36–29.62% при этом (n-6)ПНЖК – 1.35–1.4%, МНЖК составляют от 25.65% до 25.98% от суммы ЖК. Самые ненасыщенные липиды у криля из пролива Брансфилда, где установлено наибольшее содержание ПНЖК (за счет (n-3) ПНЖК) – от 43.55% до 48.% (от 41.14% до 46.48%), далее следуют МНЖК – от 20.23% до 24.75% и затем НЖК – от 29.87% до 31.17%.

Ранее [12] обсуждалось, что при повышении уровня липидов в криле ненасыщенность, устойчивость к окислению снижается, тем самым снижается и пищевая ценность. Несмотря на установленные различия содержания ПНЖК у антарктического криля из разных районов, их уровень высокий, а доминирование (n-3)ПНЖК, обладающих широким спектром положительных биологических эффектов и физиологических функций на организм, определяет пищевую значимость антарктического криля в профилактике нарушений обмена липидов, связанных с их экзогенным поступлением.

Таблица 1. Содержание общих липидов (% сухого вещества) и жирных кислот (% суммы ЖК) в гепатопанкреасе (Г), третьем абдоминальном (ЗАС) и хвостовом сегменте (ХС) у антарктического криля из трех районов Атлантического сектора Антарктики

Район	Пролив Брансфилда			Пролив Антарктик			бассейн Пауэлла моря Уэдделла		
ОЛ/ЖК	Г	ЗАС	ХС	Г	ЗАС	ХС	Г	ЗАС	ХС
ОЛ	9.87±0.96	6.79±0.39	6.64±0.5	8.74±0.46	6.39±0.07	9.44±1.27	24.24±1.25	16.56±1.33	16.97±1.23
12:0	0.08±0.01	0.01±0.01	0.04±0.02	0.06±0.03	0.08±0.01	0.08±0.04	0.12±0.01	0.11±0.01	0.12±0.01
13:0	0.04±0.01	0±0	0.02±0.01	0±0	0±0	0.02±0.01	0.04±0.01	0.02±0.01	0.03±0.01
14:0	4.57±0.68	3.87±0.42	4.13±0.62	7.45±0.94	5.64±0.23	6.8±0.46	9.6±0.42	8.84±0.35	9.54±0.39
15:0	0.31±0.03	0.23±0.03	0.24±0.04	0.18±0.04	0.16±0.02	0.18±0.02	0.19±0.03	0.19±0.03	0.19±0.03
iso15:0	0.1±0.02	0.02±0.01	0.06±0.02	0.06±0.03	0.03±0.02	0.08±0.02	0.1±0.01	0.1±0.01	0.1±0.01
anteiso15:0	0.07±0.01	0.01±0.01	0.05±0.02	0.03±0.02	0±0	0.04±0.02	0.02±0.01	0.02±0.01	0.02±0.01
16:0	19.44±0.56	20.61±0.32	19.86±0.44	21.07±0.99	20.14±0.63	21.11±0.41	21.67±0.17	21.11±0.35	21.46±0.26
iso16:0	0.08±0.02	0.01±0.01	0.04±0.02	0±0	0±0	0.01±0.01	0.03±0.01	0.03±0.01	0.03±0.01
17:0	0.12±0.02	0.11±0.03	0.09±0.02	0.01±0.01	0.02±0.02	0.04±0	0.03±0.01	0.04±0.01	0.03±0.01
iso17:0	0.23±0.03	0.11±0.03	0.17±0.03	0.09±0.03	0.09±0.02	0.11±0.01	0.12±0.02	0.12±0.01	0.13±0.02
18:0	1.85±0.18	3.7±0.45	2.35±0.23	3.56±0.94	4.7±0.42	3.6±0.38	3.11±0.16	3.75±0.19	3.33±0.13
19:0	0.08±0.01	0.21±0.04	0.1±0.02	0.11±0.08	0.16±0.03	0.08±0.02	0.03±0	0.08±0.02	0.05±0.01
20:0	1.36±0.1	3.22±0.26	2.11±0.28	6.69±3.48	11.92±2.14	7.98±1.52	6.56±0.36	8.47±1.15	7.35±0.49
21:0	0.01±0	0±0	0±0	0.07±0.04	0.21±0.08	0.1±0.03	0.09±0.01	0.12±0.02	0.09±0.01
23:0	1.2±0.65	1.88±0.54	1.49±0.36	1.11±0.29	0.47±0.04	0.43±0.25	0.04±0.01	0.05±0.02	0.04±0.01
24:0	0.28±0.02	0.66±0.07	0.39±0.07	1.27±0.65	2.18±0.35	1.48±0.26	1.23±0.07	1.59±0.22	1.37±0.09
cis14:1(n-5)	0.09±0.04	0±0	0.03±0.01	0.02±0.01	0±0	0.03±0.01	0.1±0.01	0.09±0.01	0.09±0.01
cis16:1(n-7)	4.54±1.16	4.01±0.94	3.27±0.44	6.75±0.64	5.17±0.06	6.38±0.1	6.09±0.28	6.16±0.31	6.18±0.31
cis17:1(n-7)	0.47±0.13	0.13±0.09	0.12±0.09	0.63±0.33	0.76±0.03	0.99±0.02	0.7±0.05	0.67±0.05	0.72±0.05
trans18:1(n-9)	0.13±0.03	0.08±0.04	0.1±0.03	0.05±0.03	0.05±0	0.08±0.01	0.06±0.01	0.06±0	0.06±0.01
cis18:1(n-9)	10.07±1.43	10±0.88	8.48±0.49	11.42±0.73	9.24±0.53	10.68±0.22	12.98±0.38	12.91±0.5	13.01±0.47
cis18:1(n-7)	8.71±0.46	6.99±0.34	7.7±0.47	4.64±0.28	4.27±0.27	4.46±0.12	4.92±0.11	4.67±0.12	4.68±0.1
cis20:1(n-9)	0.62±0.09	0.57±0.1	0.48±0.06	0.63±0.03	0.51±0.04	0.58±0.05	1.03±0.06	0.99±0.07	0.97±0.06
cis24:1(n-9)	0.12±0.02	0.02±0.01	0.05±0.02	0.06±0.03	0.01±0.01	0.08±0.02	0.11±0.01	0.09±0.01	0.09±0
cis18:2(n-6)	1.57±0.14	1.64±0.11	1.73±0.1	0.93±0.12	0.9±0.1	0.92±0.07	1.25±0.14	1.2±0.13	1.24±0.15
cis18:3(n-6)	0.1±0.02	0.05±0.02	0.08±0.02	0.08±0.05	0±0	0.09±0.01	0.09±0.01	0.07±0.01	0.07±0.01
cis20:2(n-6)	0.14±0.02	0.57±0.24	0.17±0.02	0.07±0.07	0.14±0.14	0.03±0.01	0.05±0	0.06±0.01	0.05±0.01
cis20:4(n-6)	0.13±0.04	0.15±0.04	0.13±0.03	0.05±0.02	0.06±0.04	0.05±0.01	0.01±0	0.02±0.01	0.02±0
cis18:3(n-3)	0.98±0.15	0.88±0.14	1.03±0.13	0.4±0.08	0.45±0.07	0.44±0.06	0.68±0.06	0.62±0.08	0.64±0.07
cis18:4(n-3)	2.12±0.39	1.79±0.32	2.06±0.39	2.35±0.35	1.87±0.21	2.27±0.32	3.75±0.36	3.28±0.34	3.48±0.38
cis20:5(n-3)	23.84±1.47	20.61±1.12	23.86±0.73	21.8±0.57	20.2±0.33	21.44±0.83	17.09±0.57	15.79±0.7	16.15±0.6
cis22:5(n-3)	0.67±0.06	0.58±0.04	0.63±0.04	0.37±0.03	0.39±0.02	0.37±0.03	0.29±0.01	0.3±0.02	0.3±0.02
cis22:6(n-3)	15.78±1.6	17.29±0.84	18.89±1.39	8.01±0.79	10.14±1.17	8.97±0.83	7.79±0.38	8.37±0.58	8.34±0.54
НЖК	29.87±0.88	34.66±0.8	31.17±1.01	41.76±3.4	45.82±2.12	42.13±1.74	43±0.3	44.64±1.11	43.9±0.54
МНЖК	24.75±2.83	21.8±1.78	20.23±1.32	24.19±1.47	20.01±0.79	23.29±0.23	25.98±0.61	25.65±0.81	25.8±0.73
(n-3) ПНЖК	43.43±2.88	41.14±2.07	46.48±1.92	32.93±1.76	33.05±1.55	33.5±1.71	29.62±0.55	28.36±1.03	28.91±0.86
(n-6) ПНЖК	1.95±0.17	2.41±0.26	2.12±0.13	1.13±0.25	1.12±0.24	1.09±0.09	1.4±0.14	1.35±0.15	1.39±0.16
ПНЖК	45.38±2.92	43.55±2.1	48.6±1.93	34.06±2	34.17±1.64	34.58±1.77	31.02±0.65	29.71±1.15	30.3±1
IA	0.54	0.55	0.53	0.87	0.79	0.84	1.05	1.02	1.06
FLQ	16.02	37.9	42.75	29.81	30.34	30.41	24.88	24.16	24.49
HN	2.67	2.48	2.7	1.75	1.85	1.78	1.56	1.58	1.54
HPI	1.82	1.81	1.88	1.14	1.27	1.20	0.94	0.98	0.94

Установлено, что ЖК-профиль исследованных тканей и сегментов криля характеризуется высоким разнообразием, но в минорном количестве, короткоцепочечных и среднецепочечных ЖК, с нечетным числом атомов углерода в цепи, а также наличием форм изо- и антеизоразветвленных

кислот, которые отражают прямое или чаще опосредованное присутствие бактерий в питании *E. superba*. Гепатопанкреас, третий абдоминальный и хвостовой сегменты различаются друг от друга набором отдельных ЖК, что связано в первую очередь с отличием этих тканей по метаболической

нагрузке и функциональной роли в организме. Наряду с этим ткани криля также различаются количественно, что указывает на влияние экзогенных факторов, таких как трофический фактор (доступность, разнообразие пищи и др.). Так, трофический маркер зоопланктона — 20:1(n-9) кислота изменяется исключительно количественно среди исследованных тканей. Недавние исследования [14] демонстрируют, что (n-9)МНЖК способствуют более полному проявлению биологических эффектов (n-3)ПНЖК в организме атлантического лосося и клеточных линий печени человека. Проведенный нами канонический анализ соответствий (ССА) показал влияние ключевых абиотических факторов (температура, соленость, концентрация кислорода и хлорофилла а) на ЖК-профиль криля, тем самым подтверждая различия липидного и ЖК состава у особей из разных регионов (рис. 2).

В этой связи следует отметить, что такие эссенциальные ЖК как линолевая кислота 18:2(n-6), α -линоленовая кислота 18:3(n-3), которые являются основоположниками физиологически значимых классов (n-6) и (n-3)ПНЖК и эндогормонов липидной природы — эйкозаноидов, а также физиологически значимые для любого организма эйкозапентаеновая кислота 20:5(n-3), ЭПК, и докозагексаеновая кислота 22:6(n-3), ДГК, также количественно различаются в исследованных тканях и сегментах криля.

Согласно результатам анализа NMDS по количественному содержанию ЖК гепатопанкреас криля из пролива Брансфилда отличается от такового бассейна Пауэлла моря Уэдделла, при этом особи из пролива Антарктик занимают промежуточное положение. Интересно, что ЖК-профили третьего абдоминального и хвостового сегмента различаются, формируя сепаратные скопления данных. Считается [15], что ЖК-профиль третьего абдоминального сегмента является “аккумулятором” ЖК-трофических биомаркеров, тем самым отражая кратковременную и долговременную взаимосвязь с трофическими условиями региона обитания криля [6,13]. В нашем исследовании показано, что расположение данных содержания ЖК, в том числе биомаркерных, на плоскости двух главных осей NMDS действительно указывает на достоверные отличия таковых в третьем абдоминальном сегменте криля (рис. 3). Так, сформированы три сепаратных, непересекающихся облака данных, что указывает на достоверные отличия основных ЖК в мышцах этого сегмента и тесную связь с экологическими факторами региона обитания.

Современная оценка пищевой ценности и качества липидов сырья и пищи основывается на расчете и анализе набора, т.н. метаболических индексов или пищевых индексов: ПНЖК/НЖК, индекс атерогенности (IA), индекс

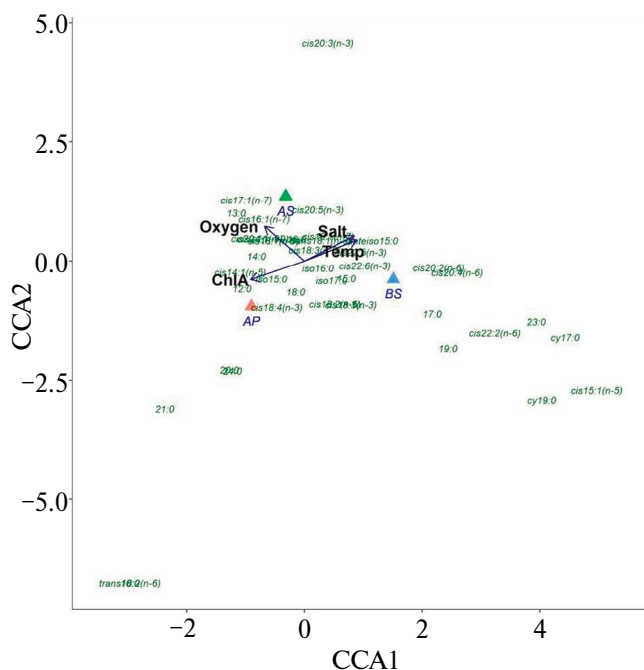


Рис. 2. Зависимость содержания жирных кислот в тканях и сегментах антарктического криля из трех регионов Атлантического сектора Антарктики от ключевых абиотических факторов (температура, соленость, концентрация кислорода и хлорофилла а) с применением канонического анализа соответствий (ССА).

Примечание: “синий треугольник” — пролив Брансфилда (BS), “красный треугольник” — полуостров Антарктический (AP), “зеленый треугольник” — пролив Антарктик (AS).

тромбогенности (IT), индекс гипо-/гиперхолестеринемии (НН), индекс укрепления здоровья (НPI), качество липидов рыбы или мяса (FLQ) [16]. В основе каждого из этих индексов лежит оценка количественного соотношения ЖК, преимущественно МНЖК и ПНЖК, индивидуальных ЖК этих классов, а также НЖК (высокий уровень которых рассматривается как фактор риска здоровья), с учетом их известных функций в метаболизме человека, биологических эффектов и роли в борьбе с нарушениями обмена веществ в организме. Среди таковых доказанных свойств следует упомянуть общеукрепляющие, иммуномодулирующие, противовоспалительные и противораковые, способность к повышению инсулинорезистентности, кроме того, известно, что несбалансированное питание по липидным компонентам может приводить к нарушениям развития, когнитивным расстройствам и развитию сердечно-сосудистых заболеваний, ССЗ [16].

Индекс качества липидов (FLQ) у антарктического криля из всех трех биотопов характеризовался очень высокими значениями (пролив

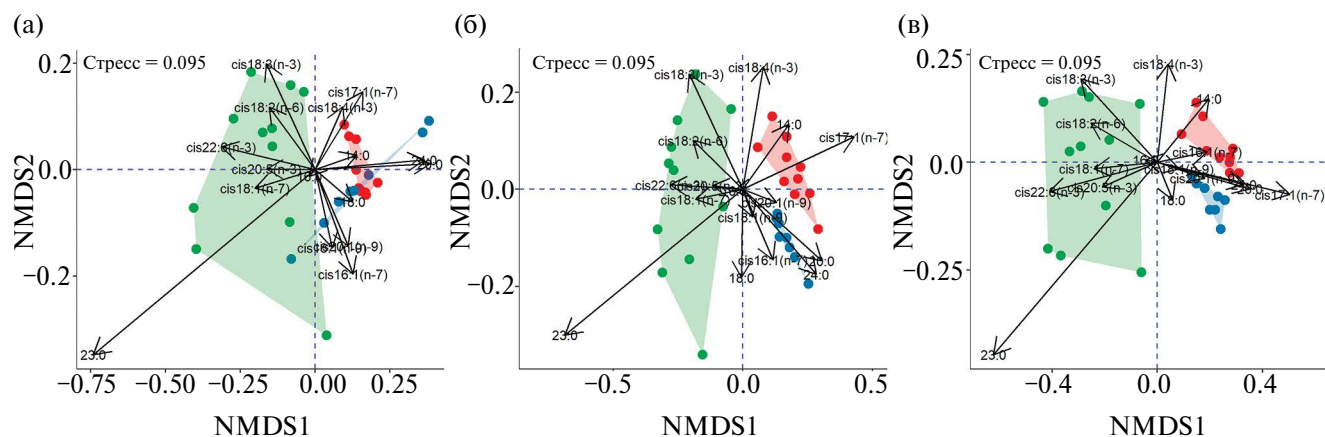


Рис. 3. Расположение данных содержания ЖК в тканях и сегментах антарктического криля из трех регионов Атлантического сектора Антарктики на плоскости двух главных осей NMSD.

Примечание к рисунку NMSD: “А” — гепатопанкреас, “В” — 3-й абдоминальный сегмент, “С” — хвостовой сегмент; “зеленая область” — пролив Брансфилда (BS), “красная область” — полуостров Антарктический (AP), “синяя область” — пролив Антарктик (AS).

Брансфилда: от 16.0 до 42.7, пролив Антарктик: от 29.8 до 30.4, бассейн Пауэлла море Уэдделла: от 24.2 до 24.9) за счет большого содержания эссенциальных 20:5(n-3) и 22:6(n-3) кислот, что подтверждает высокую пищевую ценность этого вида (табл. 1). Обнаружено, что значения этого индекса слабо различались среди исследованных органов за исключением гепатопанкреаса особей из пролива Брансфилда (16.0). Индекс атерогенности (IA), один из самых распространенных для оценки пищевой ценности продукта, поскольку отражает потенциальную агрегацию тромбоцитов в сосудах (за счет биологической активности и участия данных ЖК в этих процессах), снижение накопления холестерина и этерифицированных жирных кислот. Считается, что данный показатель ниже у продуктов, ранжируемых как “здоровая еда”, для мяса этот показатель варьирует в пределах от 0.165 до 1.32, а для усредненной группы “ежедневно потребляемая пища” — от 1.42 до 5.13. В нашем исследовании, показано, что IA различается у криля из разных регионов, но не различается в зависимости от части тела (пролив Брансфилда — 0.5, пролив Антарктик — 0.8, бассейн Пауэлла море Уэдделла — 1.0), при этом значения индекса благоприятно низкие — от 0.53 до 1.06 (табл. 1). Близкие значения IA показаны для креветки *Penaeus notialis* (0.71–0.82), таких видов рыб как атлантическая сельдь *Clupea harengus* (0.70), короткоперая корвина *Cynoscion parviinnis* (1.07–1.16), некоторые виды бурых и зеленых водорослей [16]. Пища со схожим и более низкими значениями индекса IA способствует снижению риска ССЗ, однако пределы значений данного индекса в качестве рекомендованных для поддержания здоровья человека продолжают оставаться дискуссионными. Индекс гипо-/гиперхолестеринемии

(НН) часто обсуждается в комплексе с IA, его значения для антарктического криля из разных районов различался — от 1.75 (пролив Антарктик) до 2.7 (пролив Брансфилда) и схож с таковым для морепродуктов (моллюски, креветки). Различия этого индекса между тканями и сегментами тела криля в пределах одного региона незначительны. “Здоровье-улучшающий” индекс (health-promoting index, HPI) [17], который непосредственно обозначает вклад ЖК продукта в борьбе с ССЗ, также не различался между тканями и сегментами тела криля в пределах одного региона: был наибольшим по величине у особей из пролива Брансфилда (2.5–2.7) и наименьшим у криля в бассейне Пауэлла моря Уэдделла, вблизи о-вов Джеймса Росса и Шишкова (0.94–0.98). Большинство употребляемых в пищу молочных продуктов имеют значения этого индекса в пределах от 0.16 до 0.68, при этом, чем более высокие значения индекса, тем полезнее продукт [16].

Таким образом, в настоящей работе показаны достоверные отличия антарктического криля по содержанию общих липидов и жирных кислот в его тканях (гепатопанкреас, мышцы) и сегментах тела, что связано с различиями экологических условий обитания в исследованных регионах Атлантического сектора Антарктики (рис. 4).

При этом трофический фактор во многом определяет наличие или отсутствие специфических жирных кислот пищевого происхождения, например (n-9) мононенасыщенных жирных кислот.

Тем самым для целевого извлечения отдельных компонентов липидной природы, индивидуальных ЖК и их сочетаний, с целью производства медицинских, парфюмерно-косметических

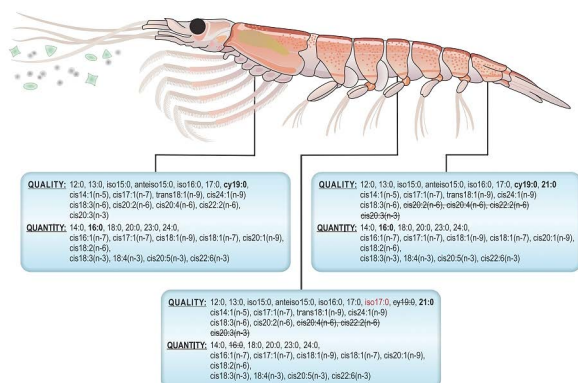


Рис. 4. Обобщенная схема профиля жирных кислот их различий по качественному и количественному составу (% суммы ЖК) в гепатопанкреасе, третьем абдоминальном и хвостовом сегменте у антарктического криля из исследованных биотопов.

Примечание: красным шрифтом выделена жирная кислота, которая встречается только в третьем абдоминальном сегменте, зачеркнутый шрифт для жирных кислот, которые не обнаружены в данной ткани или сегменте по сравнению с другими

препаратов, а также получения функциональных пищевых ингредиентов может быть рекомендована сепаратная обработка криля. Анализ основных метаболических индексов качества липидов *E. superba* свидетельствует о его высокой пищевой ценности, в том числе, благодаря высокой ненасыщенности его липидов, благоприятных для здоровья человека соотношений физиологически значимых и эссенциальных жирных кислот, что можно рассматривать как отличительную биохимическую характеристику этого вида. Установлено, что значения рассчитанных индексов не различаются между исследованными тканями и сегментами тела криля, что позволяет их совместно использовать при комплексной обработке криля с целью получения некоторых кормовых и технических продуктов. При этом необходимо учитывать регион отбора образцов для данной технологической переработки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубочайшую благодарность административному корпусу рейса АМК-87, а также экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» за всестороннюю помощь и поддержку в ходе выполнения экспедиционных работ и исследований. Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам ИО РАН А. М. Орлову, А. В. Мишину, К. В. Минину и В. Л. Семину за профессиональное проведение траловых работ и помощь в разборе материала.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа проведена в рамках государственного задания КарНЦ РАН FMEN-2022-0006.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы использования животных в экспериментах и условия ухода за ними были соблюдены.

КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trathan P.N., Hill S.L.* The importance of krill predation in the Southern Ocean. // *Biology and ecology of Antarctic krill. Advances in Polar Ecology.* / Ed Siegel V. Springer: Cham, 2016. P. 321–350.
2. *Siegel V., Watkins J.L.* Introducing Antarctic Krill *Euphausia superba* Dana, 1850 // *Biology and ecology of Antarctic krill. Advances in Polar Ecology.* / Ed Siegel V. Springer: Cham, 2016. P. 1–20.
3. *Сологуб Д.О.* Современные особенности распределения, биологии и горизонтальных миграций антарктического криля (*Euphausia superba*) в Атлантическом секторе Антарктики: дис. канд. биол. наук. М.: Изд-во ВНИРО, 2016. 247 с.
4. *Nicol S., Foster J.* The fishery for Antarctic krill: its current status and management regime // Siegel V. (eds.). *Biology and ecology of Antarctic krill. Advances in Polar Ecology.* Springer, Cham. 2016. P. 387–421.
5. FAO. 2024. FishStat: Global production by production source 1950–2022. [Accessed on 29 March 2024]. In: FishStatJ. Available at www.fao.org/fishery/en/statistics/software/fishstatj. Licence: CC-BY-4.0.
6. *Bitiutskii D.G., Samyshev E.Z., Minkina N.I., Melnikov V.V., Chudinovskikh E.S., Usachev S.I., Salyuk P.A., Serebrennikov A.N., Zuev O.A., Orlov A.M.* Distribution and demography of Antarctic krill and salps in the Atlantic sector of the Southern Ocean during austral summer 2021–2022 // *Water*. 2022. Vol. 14. P. 3812.
7. *Bouchard C., Mollard S., Suzuki K., Robert D., Fortier L.* Contrasting the early life histories of sympatric Arctic gadids *Boreogadus saida* and *Arctogadus glacialis* in the Canadian Beaufort Sea // *Polar Biol*. 2016. Vol. 39. № 6. P. 1005–1022.
8. *Kobyliansky S.G., Orlov A.M., Gordeeva N.V.* Composition of deepsea pelagic ichthyocenes of the Southern

- Atlantic, from waters of the range of the Mid-Atlantic and Walvis Ridges. // J. Ichthyol. 2010. Vol. 50. № 10. P. 932–949.
9. Folch J., Lees M., Sloan-Stanley G.H. A simple method for the isolation and purification of total lipids animal tissue (for brain, liver and muscle) // J. Biol. Chem. 1957. Vol. 226. P. 497–509.
 10. Кабаков Р.И. R в действии: Анализ и визуализация данных в программе. М.: ДМК Пресс, 2016. 580 с.
 11. Толстов Ю.Н. Основы многомерного шкалирования: учебное пособие. М.: КДУ, 2006. 160 с
 12. Антарктический криль. Справочник. / Под ред. Быковой В.М. М.: Издательство ВНИРО, 2001. 207 с.
 13. Murzina S.A., Voronin V.P., Bitiutskii D.G., Mishin A.V., Khurtina S.N., Frey D.I., Orlov A.M. Comparative Analysis of the Fatty Acid Profiles of Antarctic Krill (*Euphausia superba* Dana, 1850) in the Atlantic Sector of the Southern Ocean: Certain Fatty Acids Reflect the Oceanographic and Trophic Conditions of the Habitat // J. Mar. Sci. Engin. 2023. Vol. 11. №10. P. 1912.
 14. Østbye T.-K. K., Berge G.M., Nilsson A., Romarheim O.H., Bou M., Ruyter B. The long-chain monounsaturated cetoleic acid improves the efficiency of the n-3 fatty acid metabolic pathway in Atlantic salmon and human HepG2 cells // British J. Nutr. 2019. P. 1–14.
 15. Schmidt K., Atkinson A., Stubing D., McClelland J.W., Montoya J.P. Trophic relationships among Southern Ocean copepods and krill: some uses and limitations of a stable isotope approach // Limnol. Oceanogr. 2003. Vol. 48. №1. P. 277–289.
 16. Chen J., Liu H. Nutritional indexes for assessing fatty acids: a mini-review // Int. J. Mol. Sci. 2020. Vol. 21. № 16. P. 5695.
 17. Chen S., Bobe G., Zimmerman S., Hammond E.G., Luthman C.M., Boylston T.D., Freeman A.E., Beitz D.C. Physical and sensory properties of dairy products from cows with various milk fatty acid compositions. // J. Agric. Food Chem. 2004. Vol. 52. P. 3422–3428.

THE CONTENT OF FATTY ACIDS AND NUTRITIONAL INDEXES OF LIPIDS OF THE ANTARCTIC KRILL *EUPHAUSIA SUPERBA* COLLECTED FROM THREE REGIONS OF THE ATLANTIC SECTOR OF ANTARCTIC

S. A. Murzina^a, V. P. Voronin^a, D. G. Bitiutskii^{a, b}, Academician of the RAS N. N. Nemova^a

^a*Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation*

^b*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI “VNIRO”), Moscow, Russian Federation*

*e-mail: murzina.svetlana@gmail.com

The content of total lipids and fatty acids in tissues and body segments of adult Antarctic krill caught in three regions of the Atlantic sector of Antarctica, differing in environmental conditions, was studied. Significant differences in terms of lipid and fatty acid status of the Antarctic krill tissues and body segments in studied regions were shown. Analysis of the main metabolic indices of the *E. superba* lipids quality testifies to its high nutritional value, including due to the high unsaturation of its lipids, favorable ratios of physiologically significant and essential fatty acids for human health, which can be considered as a distinctive biochemical characteristic of this species. The results of the study can be used to form a scientifically based approach to further technological processing of raw krill and for the targeted extraction of certain substances and components of a lipid nature.

Keywords: biochemical content, fatty acids, Antarctic krill, Antarctic