

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-624-631><https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

Поступила 01.08.2025

Поступила после рецензирования 23.12.2025

Принята в печать 29.12.2025

© Вироу А. И., Аксенов А. С., Сорокина Т. Ю., 2025

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЧЕТЫРЕХ ТОКСИЧНЫХ И ДВУХ ЭССЕНЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФИЛЕ СЕМГИ ПРИ КУЛИНАРНОЙ ОБРАБОТКЕ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Вироу А. И.,* Аксенов А. С., Сорокина Т. Ю.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

семга, эссенциальные элементы, тяжелые металлы, изменение химического состава, кулинария Десять образцов семги (атлантического лосося, *Salmo salar* L.), выловленные в реке Мезень Мезенского округа Архангельской области (АО), были приготовлены традиционными для данной местности способами: варка, обжаривание, запекание и посол. Способы приготовления рыбы, посуда и сопутствующие приготовлению материалы были выбраны на основании данных анкетирования местного населения. В работе экспериментально оценено влияние четырех способов кулинарной обработки на концентрацию шести элементов в рыбном филе: ртути (Hg), мышьяка (As), свинца (Pb), кадмия (Cd), цинка (Zn) и меди (Cu). Анализ результатов эксперимента демонстрирует изменение всех шести элементов в филе семги при кулинарной обработке независимо от выбранного способа, хотя каждый способ оказывает влияние на эти показатели в разной степени. В результате исследования было выявлено, что процесс варки в наибольшей степени приводит к снижению уровня ртути и мышьяка в семге. Данный способ приготовления рыбы предпочтителен и для максимального сохранения эссенциальных элементов – цинка и меди. При этом мышьяк и свинец при варке переходят в бульон. Показано, что для снижения концентрации кадмия семгу лучше всего засаливать. Кроме того, при посоле было зафиксировано существенное снижение уровня ртути в рыбном филе. Однако этот способ приготовления также приводит к снижению концентрации эссенциальных цинка и меди. При обжаривании и запекании наблюдалось схожее изменение уровней кадмия и меди. Подтверждено, что приготовление рыбы при высокой температуре (обжаривание, запекание) способствует снижению уровней эссенциальных цинка и меди.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания № FSRU-2023-0004 Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова.

Received 01.08.2025

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

Accepted in revised 23.12.2025

Original scientific article

Accepted for publication 29.12.2025

Open access

© Virov A. I., Aksenov A. S. Sorokina T. Yu., 2025

CHANGES IN THE CONTENT OF FOUR TOXIC AND TWO ESSENTIAL ELEMENTS IN THE ATLANTIC SALMON FILLET DURING CULINARY PROCESSING BY VARIOUS METHODS

Arkadiy I. Virov*, Andrei S. Aksenov, Tatiana Yu. Sorokina

Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

KEYWORDS:

Atlantic salmon, essential elements, heavy metals, change in chemical composition, cooking

ABSTRACT

Ten samples of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) caught in the Mezen River in the Mezensky District of the Arkhangelsk Region were prepared by the methods traditional for this place: cooking, frying, baking and salting. Methods for fish preparation, utensils and auxiliary materials were chosen based on the data of survey of the local population. The study assessed experimentally an effect of four methods of culinary processing on the concentration of six elements in the fish fillet: mercury (Hg), arsenic (As), lead (Pb), cadmium (Cd), zinc (Zn) and copper (Cu). Analysis of the results of the experiment demonstrates changes in all six elements in the Atlantic salmon fillet upon culinary processing irrespective of the chosen method, although each method affected these indicators in different degrees. As a result of the study, it has been established that the cooking process led to a decrease in the level of mercury and arsenic in Atlantic salmon in the highest degree. This method of fish preparation is also preferable for the maximum preservation of essential elements – zinc and copper. With that, arsenic and lead are drawn into the broth during cooking. It has been shown that it is best to salt Atlantic salmon to reduce a concentration of cadmium. Salting also demonstrated a significant reduction in the levels of mercury in the fish fillet. However, salting also reduces the concentration of essential zinc and copper. Frying and baking demonstrated the similar effect on changes in the levels of cadmium and copper. It has been confirmed that fish preparation at a high temperature (frying, baking) facilitates a decrease in the levels of essential zinc and copper.

FUNDING: the article was prepared as part of the implementation of the state task No. FSRU-2023-0004.

1. Введение

Рыба — крайне популярный продукт питания среди жителей северных регионов России. По результатам опроса населения Мезенского округа Архангельской области, ценный представитель лососевых, семга (*Salmo salar* L.), является предпочтительным в питании видом рыбы. Это подтверждается и результатами ранее опубликованных ихтиологических [1] и антропологических [2,3] исследований.

Благодаря высокой калорийности (около 155 ккал на 100 г филе) и большому количеству белка и липидов, семга широко распространена и популярна на рынке. Кроме того, данный вид рыбы отличается сбалансированным химическим составом. Так, в литературе отмечается высокий уровень меди и цинка в филе семги [4,5]. Токсичные элементы, такие как мышьяк, свинец, ртуть и кадмий, иногда идентифицируются в филе семги, однако их уровень во многом зависит

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Вироу, А. И., Аксенов, А. С., Сорокина, Т. Ю. (2025). Изменение содержания четырех токсичных и двух эссенциальных элементов в филе семги при кулинарной обработке различными способами. Пищевые системы, 8(4), 624–631. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-624-631>

FOR CITATION: Virov, A. I., Aksenov, A. S. Sorokina, T. Yu. (2025). Changes in the content of four toxic and two essential elements in the atlantic salmon fillet during culinary processing by various methods. Food Systems, 8(4), 624–631. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-624-631>

от загрязнения водных объектов [4,6–8]. В ходе различных кулинарных обработок, как правило, происходит изменение концентрации как эссенциальных, так и токсичных элементов [9,10,11]. В связи с этим требуется изучение не только элементного состава рыбы, но и влияния способов приготовления на содержание отдельных соединений в продукции из распространенных видов рыб.

Выбор объекта исследования — семги — обусловлен ограниченностью информации о влиянии различных способов приготовления на ее элементный состав, а также историко-культурными особенностями потребления этой рыбы населением Мезенского округа. Семга являлась одной из основных промысловых рыб поморов. Семужий промысел впервые появился в Белом море примерно в III тысячелетии до нашей эры. Изначально вылов семги был не так велик и велся исключительно для личных нужд. В новгородский период Руси появились первые налоги на вылов, которые крестьяне выплачивали семгой. В XVI веке, благодаря хозяйственной деятельности северных монастырей, начался рост народонаселения севера, и семга стала промысловой рыбой. В конце XVI — начале XVII столетия Россия пережила войны со Швецией и период Смутного времени, что привело к разорению множества промысловых деревень, уничтожению промысловых судов. К концу XVII столетия регион восстановился и вылов рыбы вновь стал расти, способствуя улучшению экономического положения поморов. К XIX веку государство обратило внимание на сокращение популяции семги в северных реках и предприняло попытки контроля вылова. Крестьяне игнорировали большинство ограничений или исполняли их формально, что практически полностью перевело данный вид промысла в сферу нелегальной деятельности и привело к значительному сокращению популяции семги, последствия которого ощущаются в регионе по настоящее время [12,13]. На современном этапе допустимый объем вылова устанавливается и изменяется ежегодно на основе биологических, экономических и правовых механизмов регулирования [14].

1) Вы проживаете в Мезенском округе Архангельской области?

- да
- нет

2) Как давно вы проживаете в Мезенском округе Архангельской области?

с _____. _____. _____. г.
до _____. _____. _____. г.

3) В каком населенном пункте вы проживаете?

4) Как часто вы употребляете семгу в пищу?

- не употребляю
- один раз в полгода или реже
- один раз в месяц
- один раз в неделю и чаще

5) Как вы предпочитаете готовить семгу?

- засаливать
- варить
- жарить
- запекать
- другое

6) Какую соль вы используете при посоле семги?

- йодированную
- не йодированную
- не обращаю внимание

7) Какую соль вы используете при других способах приготовления семги?

- йодированную
 - не йодированную
 - не обращаю внимание
- подсолнечное нерафинированное
 - подсолнечное рафинированное
 - оливковое первого отжима (extra virgin)
 - оливковое рафинированное
 - сливочное

9) Укажите марку масла, которые вы используете чаще всего.

Целью данного исследования является изучение влияния варки, запекания, посола и обжаривания на уровень цинка, меди, кадмия, свинца, ртути и мышьяка в семге с последующим выявлением наиболее подходящих способов обработки для уменьшения концентрации токсичных и сохранения эссенциальных элементов.

2. Объекты и методы

2.1. Анкетирование

Рыба, использованная для эксперимента, была выловлена в реке Мезенского округа Архангельской области в рамках реализации проекта РНФ 22-15-20076 «Мониторинг, оценка и прогнозирование угроз для здоровья человека, связанных с неконтролируемыми переносами загрязняющих веществ и патогенов мигрирующими видами рыбы и птицы, добываемыми жителями Архангельской области традиционными для данной местности способами». Одной из задач настоящего исследования было проведение лабораторного эксперимента в условиях, максимально приближенных к реальным. Для этого среди населения Мезенского округа Архангельской области (в период проведения настоящего исследования Мезенский муниципальный район был преобразован в Мезенский муниципальный округ) было проведено онлайн-анкетирование с целью определения способов приготовления семги, традиционных для данной местности. Анкета была составлена с помощью бесплатного сервиса «Яндекс Формы» (Рисунок 1).

Анкетирование проводилось в течение одного месяца в группах популярной российской социальной сети «ВКонтакте». Для этих целей были выбраны местные сообщества, посвященные жизни в Мезенском округе: «Реальность нашего поселка Каменка Мезенский округ», «Официальная страница сетевого издания «Север», «Подслушано Мезень», «Долгоцелье».

Всего анкетирование прошли 78 человек, однако после применения критериев включения было отобрано 54 анкеты. Критериями включения были определены: а) возраст анкетируемого лица

10) Какую воду вы используете при приготовлении пищи?

- бутилированную
- кипяченую
- фильтрованную водопроводную

11) Посуду из какого материала вы используете при приготовлении ухи?

- алюминиевую
- эмалированную
- другое, а именно _____

12) Посуду из какого материала вы используете при обжаривании семги?

- с тефлоновым покрытием
- чугунную
- другое, а именно _____

13) Посуду из какого материала вы используете при запекании семги?

- керамическую
- глиняную («латка»)
- с тефлоновым покрытием
- другое, а именно _____

14) К какой возрастной категории вы относитесь?

- 18-25 лет
- 26-35 лет
- 36-50 лет
- 51-70 лет
- старше 70 лет

15) Используете ли вы сахар при посоле семги?

- да
- нет
- не солю рыбу

Рисунок 1. Вид анкеты жителей Мезенского округа Архангельской области
Figure 1. Questionnaire for the residents of the Mezensky District of the Arkhangelsk Region

старше 18-ти лет; б) постоянное проживание анкетируемого лица на территории Мезенского округа. Анализ результатов анкетирования позволил определить приоритетные способы приготовления семги, а также сопутствующие продукты и, наиболее подходящие материалы для используемой посуды.

2.2. Отбор образцов

Для целей настоящего исследования использовались образцы 10 особей семги, выловленных в реке Мезень местными жителями летом 2022 года и осенью 2023 года. Средний вес отобранных особей рыбы составил 4019 грамм, средний возраст — 2 года. До начала эксперимента рыба содержалась в морозильном ларе Gorenje FH 40 BW (Gorenje, Сербия) при температуре минус 20 °C. Для целей эксперимента рыба размораживалась при комнатной температуре в течение 12 часов, после чего от каждой особи отделялось по 6 кусков филе весом по 50 грамм. Пять кусков (образцов) филе подвергались кулинарной обработке. Один кусок (образец) — исходный — был сразу гомогенизирован с помощью погружного блендера JMK-3016 (Jamaty, Китай), лиофильно высушен с помощью FreeZone (Labconco, США) и до проведения количественного химического анализа помещен в морозильный шкаф сверхглубокой заморозки Binder UF V 500 (Binder, Германия) для хранения при температуре минус 80 °C.

2.3. Кулинарная обработка

По результатам анкетирования приоритетными способами кулинарной обработки семги были выбраны четыре: варка, посол, запекание и обжаривание (Рисунок 2). Филе каждой особи семги подвергалось каждому способу кулинарной обработки. Используемая посуда перед приготовлением каждого образца филе рыбы промывалась дистilledированной водой. Варка первого образца филе рыбы производилась в течение 10 минут при температуре 100 °C на лабораторной плите «ПЭ» (ОАО «Электроприбор», Россия) с использованием фильтрованной воды в кастрюле из нержавеющей стали объемом 600 мл. Для фильтрования воды использовался фильтр «Аквафор Стандарт» («Аквафор», Россия). В соответствии с рецептами, описанными в книге «Северная кухня» [15], использовали 1 грамм не йодированной соли «Илецкая» (ООО «Руссоль», Россия). Пробоподготовка для последующего количественного химического анализа (КХА) осуществлялась только в отношении образца филе. Второй образец филе рыбы был приготовлен таким же способом, однако пробоподготовка для КХА осуществлялась в отношении филе вместе с получившимся бульоном. Посол третьего образца филе рыбы производился с использованием 6 грамм не йодированной соли. Образец натирали солью со всех сторон, после чего заворачивали в пергаментную бумагу и помещали в пищевой эмалированный контейнер. На образец помещались гнет и крышка, что соответствовало традиционному способу посола. Контейнер с образцом выдерживали в холодильнике ХФ-140 (POZIS, Россия) в течение 12 часов при температуре 4,7 °C, после чего образец подвергался пробоподготовке для КХА без жидкости, которая образовалась в процессе посола. Для запекания четвертого образца филе рыбы использовалась электрическая печь Electrolux EOB53202 X (Electrolux, Германия) и «латка» (традиционно и широко используемая на севере Архангельской области глиняная миска, изготавливаемая мезенскими мастерами из местных природных материалов [16]). Образец был предварительно посолен 1 граммом не йодированной соли и смазан рафинированным подсолнечным маслом «Золотая сечечка» (АО «Юг Руси», Россия). Затем помещен в печь, разогретую

до температуры 180 °C, на 20 минут. Пятый образец филе рыбы обжаривался по 3 минуты с обеих сторон на чугунной сковороде, предварительно смазанной растительным маслом и нагретой до 180 °C. В процессе обжаривания образец был обработан 1 граммом соли. Все приготовленные ($n=50$) и контрольные ($n=10$) образцы были гомогенизированы с помощью погружного блендера JMK-3016 (Jamaty, Китай), лиофильно высушенны с помощью FreeZone (Labconco, США) и до проведения количественного химического анализа помещены в морозильник Binder UF V 500 (Binder, Германия) для хранения при температуре минус 80 °C. Гравиметрическим методом определяли убыль массы рыбы после кулинарной обработки с использованием аналитических весов PIONEER (OHAUS, Германия).

2.4. Химический анализ

Во всех образцах определяли концентрацию шести элементов: ртуть (Hg), мышьяк (As), свинец (Pb), кадмий (Cd), цинк (Zn) и медь (Cu). Помимо этого, исходные образцы были исследованы на соответствие требованиям ТР ТС 021/2011¹. Содержание токсичных элементов (свинец, кадмий, мышьяк и ртуть) в исходном сырье не превышало установленные нормативы.

Количественный химический анализ проводился с помощью инверсионно-вольтамперометрического метода с применением аналитического вольтамперометрического комплекса СТА в соответствии с МУ 08-47/136², МУ 08-47/167³ и МУ 08-47/175⁴. Для анализа проб рыбы по МУ 08-47/136² одновременно использовали две параллельные и одну холостую (контрольную) пробу. Проба весом 0,5–1 грамма подвергалась минерализации с использованием концентрированной азотной кислоты, пероксида водорода с последующим нагреванием до температуры в 450 °C. После из полученного минерализата для ИВ-измерения отбирали аликвоту объемом 10 см³. Пробоподготовка к измерению массовой концентрации ртути по МУ 08-47/167⁵: в гомогенизированную пробу добавляли азотную кислоту, после чего проба нагревалась до полного растворения. После охлаждения тары до комнатной температуры из раствора брали аликвоту и нагревали ее до 120 °C, добавляя раствор перекиси водорода. После остывания в пробу вносили 0,04 см³ раствора золота. Пробоподготовка к измерению массовой концентрации мышьяка по МУ 08-47/175⁴: в пробу добавляли раствор нитрата магния и азотную кислоту, после чего раствор нагревали до 100 °C. После растворения пробу выпаривали при температуре 120–130 °C. Проба повторно (5–6 раз) обрабатывалась азотной кислотой и пероксидом водорода. Сухой остаток пробы помещался в разогретую муфельную печь. Полученный сухой остаток после остывания разбавляли бидистилированной водой и серной кислотой, также добавляли сернокислый гидразин. Раствор вновь нагревали до 300 °C до полного высыхания. В конце пробоподготовки добавляли трилон Б.

В стаканчик с раствором фонового электролита была внесена аликвота пробы объемом 1,0 см³. В раствор помещались индикаторный электрод (катод) и электрод сравнения (анод). Чувствительность прибора (вольтамперометрический анализатор TA-Lab, Россия) была установлена на значение $4 \cdot 10^{-9}$ А/мм, а время электролиза составляло 150 секунд. Затем включалось пропускание газа через испытуемый раствор для его перемешивания в течение 180 секунд. После

¹ ТР ТС 021/2011 «Технический регламент Таможенного союза. О безопасности пищевой продукции (с изменениями на 22 апреля 2024 года). Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 880.

² МУ 08-47/136 «Продукты пищевые и продовольственное сырье. Инверсионно-вольтамперометрические методы определения содержания токсичных элементов (кадмия, свинца, меди и цинка)» (Документ разработан в Томском политехническом университете и ООО ВНП Ф «ЮМХ». Методика аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563 (ГОСТ 8.010). Документ зарегистрирован в Федеральном реестре методик выполнения измерений, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора РФ (регистрационный код ФР.1.31.2005.01637).

³ МУ 08-47/167 «Рыба, морепродукты, нерыбные объекты промысла и продукты, вырабатываемые из них. Вольтамперометрический метод измерения массовой концентрации ртути» (Документ разработан в Томском политехническом университете, ООО ВНП Ф «ЮМХ» и ООО «НПП Томбакалит». Методика аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563 (ГОСТ 8.010). Документ зарегистрирован в Федеральном реестре методик выполнения измерений, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора (регистрационный код ФР.1.31.2005.01452)).

⁴ МУ 08-47/175 «Продукты пищевые и продовольственное сырье. Инверсионно-вольтамперометрический метод определения массовой концентрации мышьяка» (Документ разработан в Томском политехническом университете и ООО ВНП Ф «ЮМХ». Методика аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563 (ГОСТ 8.010). Методика внесена в Государственный реестр методик выполнения измерений, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора (регистрационный код ФР.1.31.2005.01552)).

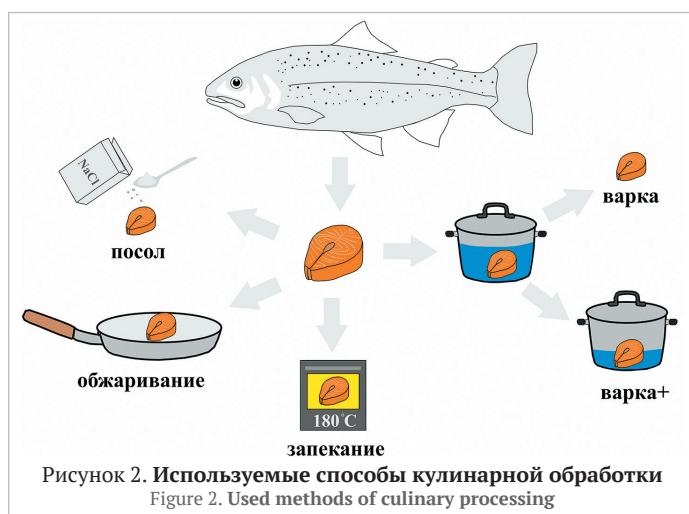


Рисунок 2. Используемые способы кулинарной обработки
Figure 2. Used methods of culinary processing

этого проводился процесс электролиза в растворе фонового электролита, также в течение 180 секунд при заданной чувствительности полярографа. По окончании электролиза газ был отключен и через 5 секунд была начата регистрация вольтамперограммы в диапазоне потенциалов от минус 1,20 В до 0,15 В. После этого потенциал останавливался при 0,15 В и проводилось доростворение примесей с поверхности электрода при перемешивании раствора газом в течение 20 секунд. Процесс электролиза повторялся 3 раза. Сначала измерили высоты анодных пиков определяемых элементов с помощью измерительной линейки. Затем в стаканчик с анализируемым раствором с помощью пипетки или дозатора внесли добавки аттестованных смесей элементов так, чтобы высоты соответствующих анодных пиков на вольтамперной кривой увеличились примерно в два раза по сравнению с первоначальными значениями. При этом добавки вводились в малом объеме (не более 0,2 см³), чтобы избежать изменения концентрации раствора фонового электролита и разбавления анализируемой пробы. Далее проводился электролиз и регистрация вольтамперограмм анализируемой пробы с введенными добавками АС кадмия, свинца, меди и цинка три раза, с соблюдением тех же условий, что и при первоначальном анализе. После этого были измерены высоты анодных пиков элементов в пробе с добавками АС. Затем содержимое стаканчика вылили, стаканчик промыли биодистиллированной водой и повторили все операции для каждой из параллельно анализируемых проб и для холостой пробы, соблюдая одинаковые условия проведения эксперимента.

При анализе пробы на уровень содержания ртути с использованием анализатора СТА одновременно проводился анализ двух параллельных и одной холостой проб в трех разных стаканчиках. Подготовленные для измерения пробы и холостая пробы были помещены в электрохимическую ячейку, опускались электроды. В результате выполнения серии измерений было выведено 4 вольтамперограммы. С помощью пипетки вносились добавки АС ртути объемом 0,01 см³ и концентрацией 1 мг/дм³. После завершения всех измерений, исключения выпавших кривых и усреднения результатов анализ пробы на содержание ртути был завершен. Анализ пробы на содержание мышьяка проводится аналогичным способом, за исключением того, что добавка имеет объем 0,02 см³ и концентрацию 10 мг/дм³.

Статистическая обработка проводилась с применением программного обеспечения SPSS (IBM Corp., Армонк, Нью-Йорк, США). Были рассчитаны средние геометрические значения и стандартные отклонения концентраций токсичных и эссенциальных элементов в образцах филе семги до и после приготовления. Для оценки соответствия данных нормальному распределению был применен тест Шапиро-Уилка [17]. Непараметрические тесты Крускала-Уоллиса были проведены для проверки значимости возможных различий содержания элементов в семге в зависимости от способа приготовления. При значениях $p < 0,05$ различия были значимыми (уровень достоверности 95%).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Результаты анкетирования

Средний возраст участников анкетирования составил 43 года. Самыми активными участниками были люди в возрасте от 51 до 70 лет (40,74%, $n = 22$) и в возрасте от 36 до 50 лет (35,19%, $n = 19$). Наименьшее количество анкет было заполнено участниками возрастных групп от 18 до 25 лет ($n=1$), от 26 до 35 лет ($n=7$) и старше 70 лет ($n=5$), что составило 1,85%, 12,96% и 9,26% соответственно. Самым популярным способом приготовления семги в пищу стал посол, что было отмечено 79,63% опрошенных ($n=43$). Респонденты также отметили варку — 35,19% ($n=19$), обжаривание и запекание — 51,85% ($n=28$). Обжаривание и запекание в анкете были приведены вместе в одном вопросе, однако в связи с тем, что при этих двух способах приготовления рыбы используется разная посуда, которая потенциально могла оказать влияние на результаты количественного химического анализа приготовленных образцов, во время проведения эксперимента было принято решение о выделении каждого из этих способов в отдельный этап.

Следующие вопросы анкеты касались используемых продуктов и посуды при приготовлении рыбы. Так, при посоле 81,48% опрошенных используют не йодированную соль ($n=44$). При других способах приготовления рыбы также большинство предпочитает использовать не йодированную соль — 64,81% ($n=35$). Сахар при посоле используют только 16,67% опрошенных, остальные 77,78% предпочитают его не использовать. Из 54 человек 34 (62,96%) применяют подсолнечное рафинированное масло, 11 (20,37%) — подсолнечное нерафинированное масло, а 9 (16,67%) — сливочное масло. При этом было выявлено, что самой популярной маркой подсолнечного рафинированного масла среди местного населения является «Золотая семечка» (АО «Юг Руси», Россия) ($n=21$ или 38,89%). При

варке рыбы респондентами чаще всего используется фильтрованная водопроводная вода ($n=35$ или 64,81%). Варят рыбу обычно в эмалированной посуде ($n=25$ или 46,30%) или в посуде из нержавеющей стали ($n=12$ или 22,22%), а обжаривают в чугунной посуде ($n=18$ или 33,33%) или в посуде с тefлоновым покрытием ($n=11$ или 20,37%). Наиболее популярным материалом посуды для запекания рыбы стала глина ($n=37$ или 68,52%), из которой изготавливают посуду, традиционно используемую для приготовления рыбы [16].

3.2. Изменение массы филе семги при различных кулинарных обработках

Кулинарная обработка каждым из используемых способов приводит к потере массы продукта, обусловленной испарением воды и прилипанием частиц продукта к посуде в ходе приготовления (Рисунок 3). Наибольшая средняя потеря массы отмечена при запекании. Причиной этому послужила высокая температура нагревания продукта, наивысшая в сравнении с другими способами обработки, что привело к наибольшему испарению жидкости из образца филе. При варке также были отмечены большие потери массы, что связано с отделением небольших частиц филе в бульон. При посоле потери массы оказались наименьшими. При обжаривании происходит и отделение частиц пробы, и испарение влаги, но эти факторы в меньшей степени влияют на убыль массы конечного продукта.

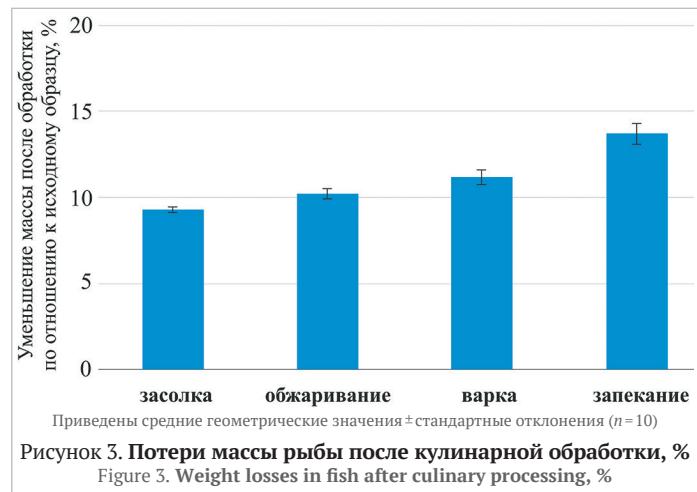


Рисунок 3. Потери массы рыбы после кулинарной обработки, %
Figure 3. Weight losses in fish after culinary processing, %

3.3. Содержание четырех токсичных и двух эссенциальных элементов в исходных образцах филе семги

В Таблице 1 представлены результаты химического анализа образцов семги до кулинарной обработки. В сравнении с ранее проведенными исследованиями [7,8,10] следует отметить ряд особенностей элементного состава проб *Salmo salar* L., используемых в настоящей работе. В частности, в сравнении с семгой с семгой, выловленной в водах Ненецкого автономного округа (НАО) [18], в исследуемых образцах существенно ниже уровень мышьяка (Таблица 1). Кроме того, содержания цинка и меди имеют более низкие концентрации, причем содержание Cu в два и более раз выше уровня Zn в филе семги. В соответствии с Приложением 1 к Техническому регламенту ЕАЭС 040/2016⁵, показатели всех проб рыбы по какому-либо веществу не превышают установленных норм (Таблица 1).

Таблица 1. Содержание четырех токсичных и двух эссенциальных элементов в семге

Table 1. Content of four toxic and two essential elements in Atlantic salmon

Химический элемент	Настоящее исследование, р. Мезень*	Исследование 2017–2019 гг., р. Печора [18]	Допустимая концентрация
Ртуть, мкг/кг	62,8 ± 1,5	< 1,0	500
Мышьяк, мг/кг	0,323 ± 0,012	1,550 ± 0,499	5
Кадмий, мкг/кг	28,4 ± 2,1	0,3 ± 0,2	200
Свинец, мкг/кг	25,0 ± 3,1	2,6 ± 0,1	1000
Цинк, мг/кг	0,142 ± 0,052	6,650 ± 1,055	—
Медь, мг/кг	0,385 ± 0,014	1,068 ± 0,310	—

Примечание: * приведены средние геометрические значения ± стандартные отклонения ($n=10$).

⁵ ТР ЕАЭС 040/2016 Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» (принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 18 октября 2016 года № 162).

3.3. Ртуть

Ртуть является крайне токсичным соединением, которое наиболее сильно накапливается в высокой концентрации в рыбе, находящейся на вершине трофических цепей водных объектов. Сама же рыба является повсеместным продуктом питания, являющимся особенно важной частью рациона у жителей арктических или приарктических территорий. Следует отметить, что накопление ртути в организме рыб обусловлено концентрацией ее токсичных форм, при этом до 80 % содержания ртути обнаруживается в виде метилртути (MeHg) [19]. В связи с вероятностью присутствия ртути в подобных формах содержание данного элемента в рыбе является одним из ключевых критериев безопасности в системе биомониторинга [20].

В случаях продолжительного потребления загрязненной рыбы содержание ртути в организме, как правило, увеличивается, что, в свою очередь, оказывает негативное воздействие на здоровье и самочувствие человека. Данные о влиянии кулинарной обработки на содержание ртути в пище противоречивы: исследователи приходят к противоположным выводам. Имеются как исследования, показывающие повышение концентрации ртути после кулинарной обработки, так и работы, в которых при аналогичных исходных условиях концентрация ртути уменьшалась.

В настоящем исследовании использовались образцы семги с содержанием ртути, характерным для уровня данного токсического элемента в диких образцах лососей: не более 70 мкг/кг, в соответствии с [21]. В результате эксперимента продемонстрированы следующие результаты изменения содержания ртути в семге при кулинарной обработке (Рисунок 4). В среднем при приготовлении каждым из четырех способов количество содержащейся ртути уменьшается. Показано, что наименее эффективным в данном контексте способом является обжаривание, наиболее — варка.

На Рисунке 2 видно, что наиболее высокая концентрация ртути наблюдается при обжаривании, далее следуют запекание, посол и варка. При рассмотрении пробы варки, в которой учитывался и бульон, концентрация становится еще ниже. Заметна корреляция между потерей массы образца и концентрацией ртути в нем. Наибольшие потери массы наблюдаются при обжаривании и запекании, наименьшие — при варке. Ранее Гремячих с соавторами отмечали отсутствие влияния способа кулинарной обработки рыбы на абсолютное содержание ртути, использовав в исследованиях речного окуня [6]. Другими авторами отмечено снижение уровня ртути в филе длиннохвостого тунца при обжаривании, но увеличение концентрации данного элемента при варке [22]. Безусловно, наблюдаемые различия в поведении ртути при различных способах приготовления рыбы зависят от ее исходной концентрации в сырье и от метода анализа. В настоящей работе впервые использованы 5 разнообразных способов приготовления дикой семги и проанализировано изменение содержания 4 токсичных и 2 эссенциальных элементов. Для ртути получена тенденция к снижению концентрации в филе семги при всех вариантах кулинарной обработки, особенно при варке.

3.4. Мышьяк

Неорганические соединения мышьяка, содержащиеся в рыбе, опасны для человека. При продолжительном употреблении в пищу рыбной продукции с повышенным уровнем содержания мышьяка он может вызывать проблемы с кожей, такие как очаговая гиперпигментация и гиперкератоз (утолщение кожи). Кроме того, мышьяк демонстрирует канцерогенные свойства, способствуя развитию рака кожи, легких и мочевого пузыря, а в некоторых случаях также рака печени и почек. Воздействие мышьяка также способно вызывать

сердечно-сосудистые проблемы, включая аномальное сердцебиение, высокое кровяное давление и даже отказ системы кровообращения или гангрену. Ранее нами было показано, что в арктическом регионе уровень мышьяка в крови жителей в том числе связан с потреблением анадромных рыб, к которым относится семга, и достигает более 10 мкг/л [23]. Поэтому использование на севере в питании видов с высоким уровнем мышьяка рекомендуется ограничивать определенным группам населения, прежде всего детям и женщинам репродуктивного возраста. Известно, что у беременных женщин мышьяк может нарушать внутриутробное развитие плода, что приводит к низкому весу при рождении и к проблемам с гормональной и нервной системами [18].

Данные о мышьяке и влиянии кулинарной обработки на его концентрации также противоречивы и требуют дополнительных исследований. Так, в одной из работ проведен масштабный анализ поведения мышьяка при различных способах приготовления пищевых продуктов. Ученые пришли к выводу о том, что при варке рыбы ряд соединений мышьяка переходят в бульон, снижая его концентрацию в образцах вареного филе после отделения от жидкости [24]. Подобная тенденция характерна и для результатов нашего исследования (Рисунок 5). Видно, что концентрация мышьяка при варке уменьшается, однако в образцах, проанализированных вместе с бульоном, она, хотя и ниже исходного уровня, существенно превышает концентрацию в образцах после отделения бульона.

Известно, что в эндемичных по мышьяку регионах большинство термических процессов приготовления пищи приводят к значительному увеличению концентрации неорганического мышьяка [4]. Учитывая, что к таким территориям относится Арктику, следовало ожидать повышения концентрации данного токсического элемента в филе семги при обжаривании и запекании, где температура приготовления выше, чем при обычной варке. Но, как мы отмечали ранее, в исследованиях использовались образцы семги с меньшим уровнем мышьяка, чем в рыбах того же вида из соседних крупных рек северо-запада Российской Федерации [10]. Следовательно, на полученные результаты повлиял ряд факторов: соотношение форм мышьяка в филе после приготовления, мобильность соединений при высокой температуре, взаимодействие As при относительно низкой концентрации с белково-липидной матрицей семги. Посол практически не повлиял на концентрацию мышьяка в приготовленной рыбе.

3.5. Свинец

Свинец, содержащийся в рыбе, представляет опасность для здоровья человека из-за своего токсического воздействия на организм. Он негативно влияет на четыре основные системы органов: кровеносную, нервную, желудочно-кишечную и почечную. В кровеносной системе свинец вызывает анемию, поскольку нарушает синтез гемоглобина и ускоряет гибель эритроцитов. Поражение центральной нервной системы проявляется снижением умственной способности, ухудшением памяти, агрессивным поведением и параличами мышц рук и ног. В желудочно-кишечном тракте острое отравление сопровождается потерей аппетита, болью. Также свинец оказывает токсическое воздействие на другие органы, например, почки, что может привести к нарушениям их функций [25,26]. Данные эффекты на организм

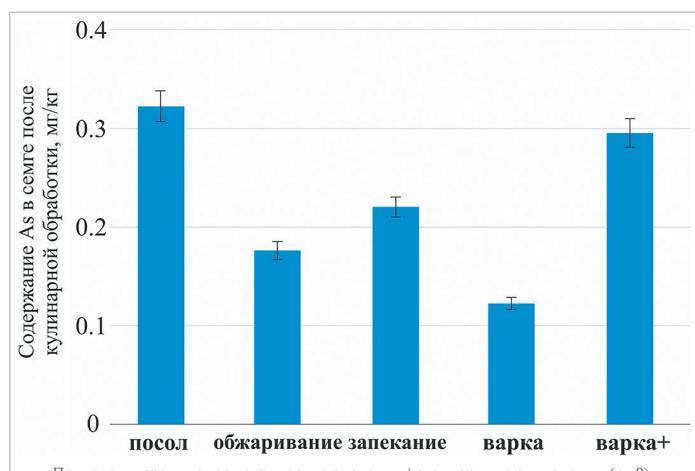


Рисунок 4. Содержание ртути в семге после приготовления
Figure 4. Content of mercury in Atlantic salmon after preparation

Рисунок 5. Содержание мышьяка в семге после приготовления
Figure 5. Content of mercury in Atlantic salmon after preparation

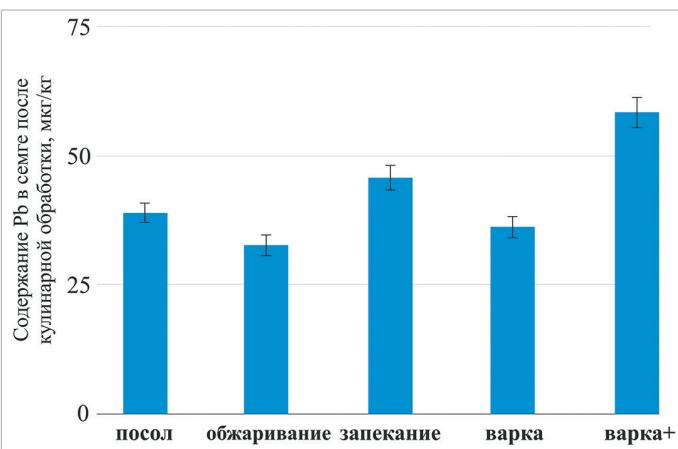


Рисунок 6. Содержание свинца в семге после приготовления
Figure 6. Content of lead in Atlantic salmon after preparation

могут иметь место при высоком уровне содержания этого токсичного элемента в пищевых продуктах. Например, в коммерческих видах рыбы концентрация Pb может достигать 6,95 мг/кг [27]. В наших исследованиях содержание свинца в 100–200 раз ниже этих значений, в зависимости от способа кулинарной обработки (Таблица 1).

Результаты эксперимента свидетельствуют об увеличении содержания Pb после применения всех способов кулинарной обработки семги (Рисунок 6). Наибольшая концентрация свинца обнаружена в запеченном и вареном образцах с добавлением бульона. Учитывая низкое изначальное содержание, вероятно, большая часть свинца при варке поступает в воду и филе из посуды, используемой при готовке, увеличивая концентрацию данного элемента в сравнении с контрольным образцом. Повышенное количество свинца при запекании обуславливается потерей массы пробы, приводящей к повышению концентрации металла в образце. При прочих способах приготовления снижение уровня свинца не наблюдается, а на его концентрацию влияет ряд факторов, включая затруднение мобильности при малых концентрациях, воздействие металлической посуды и потерю массы. В исследовании Rajkowska-Myśliwiec и соавторов [10] проводился анализ семги, приготовленной несколькими способами с использованием различной посуды из разных материалов. Уровень свинца при обжаривании составил 60 мг/кг, что несколько выше, чем показано на Рисунке 6.

3.6. Кадмий

Кадмий – тяжелый металл, не имеющий биологической функции в организме, накапливается в рыбе, так как имеет длительный период полувыведения. При употреблении загрязненной рыбы кадмий попадает в организм человека, накапливается в почках, печени и костях. Избыток кадмия ингибирует активность ферментов, нарушая метаболические процессы, и вызывает окислительный стресс, повреждая клеточные мембранны и ДНК. Несмотря на то, что, как правило, рыба не может существенно оказывать влияние на уровень кадмия в организме человека, в ряде загрязненных регионов концентрация данного токсичного элемента в тканях морских представителей ихтиофауны может достигать 3,76 и более мг/кг [27,28]. Полученные нами данные свидетельствуют о невысоком исходном значении, не превышающем 0,1 мг/кг (Таблица 1).

Наибольшая концентрация кадмия в филе семги обнаружена при варке (Рисунок 7). Единственный способ приготовления, при котором концентрация кадмия снижается – посол. Abbas с соавторами [29] уже демонстрировали подобный эффект для мокрого способа посола карпа. Уровни кадмия при обжаривании и запекании сходны, что может быть следствием общей схожести этих двух способов приготовления рыбы. При этом корреляции между содержанием кадмия и способом кулинарной обработки не обнаружена, что во многом объясняется низким ее значением. Однако, в сравнении с работой [10], где содержание кадмия после обжаривания форели составляло 10 мкг/кг, в нашем исследовании уровень данного токсичного элемента выше (Рисунок 7), что во многом связано с более высоким исходным содержанием в используемых образцах семги (Таблица 1).

Выведение токсичных элементов из продукта питания – одна из многих задач кулинарной обработки. В зависимости от типа загрязнения продукта, преобладающего в нем токсичного вещества, стоит подобрать наиболее подходящий способ кулинарной обработки. В исследуемых нами образцах показатели концентрации токсичных

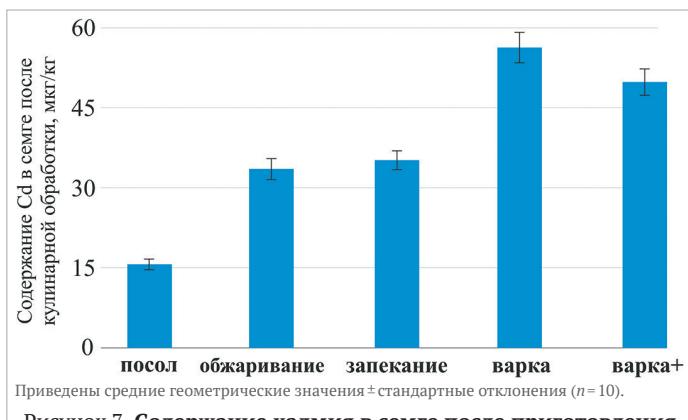


Рисунок 7. Содержание кадмия в семге после приготовления
Figure 7. Content of cadmium in Atlantic salmon after preparation

элементов находятся в пределах рекомендуемых нормативов, что позволяет потребителю выбирать способ приготовления филе, исходя исключительно из своих вкусовых предпочтений.

3.7. Цинк

Цинк – жизненно важный микроэлемент, играющий ключевую роль в синтезе ферментов, обмене белков и гормонов, поддержании репродуктивной функции и иммунной защиты организма. Морепродукты являются наилучшим источником цинка для человека. Дефицит цинка приводит к различным патологическим состояниям, таким как утомляемость, снижение памяти, ослабление иммунитета [30]. Важной особенностью цинка в живых организмах является его способность к снижению абсорбции кадмия и свинца в желудочно-кишечном тракте и влияние на аккумуляцию свинца в различных тканях [27]. Но данное вещество может быть опасно при значительных передозировка, например, при продолжительном употреблении в пищу рыбы с повышенной концентрацией цинка. Это может привести к быстрой утомляемости, анемии.

Уровень данного эссенциального элемента в исследуемых исходных образцах семги в 5 и более раз ниже, чем в образцах, ранее изученных в северо-западном секторе Российской Арктики [18,23,31]. Содержание цинка в филе семги максимально при варке (Рисунок 8). Также увеличенные значения концентрации данного эссенциального элемента в сравнении с контролем характерны для обжаривания и посола. При запекании, напротив, наблюдается снижение уровня цинка. Связано это с обогащением воды цинком во время фильтрации. При посоле увеличение концентрации цинка может быть обусловлено внесением элемента с солью. Пониженная же концентрация при запекании может быть обусловлена образованием более подвижных форм цинка при максимальной температуре среди всех используемых способов кулинарной обработки. Сопоставляя полученные результаты с литературными данными, можно найти сходство. Например, в работе [15] продемонстрирована концентрация цинка при запекании, равная 0,45 мг/кг. В статье канадских исследователей [11] отмечена концентрация цинка в запеченной радужной форели (представителе лососевых), равная 0,510 мг/кг. Следовательно, в немногочисленных научных работах есть сопоставимые данные, но только по отдельным способам приготовления и элементам.

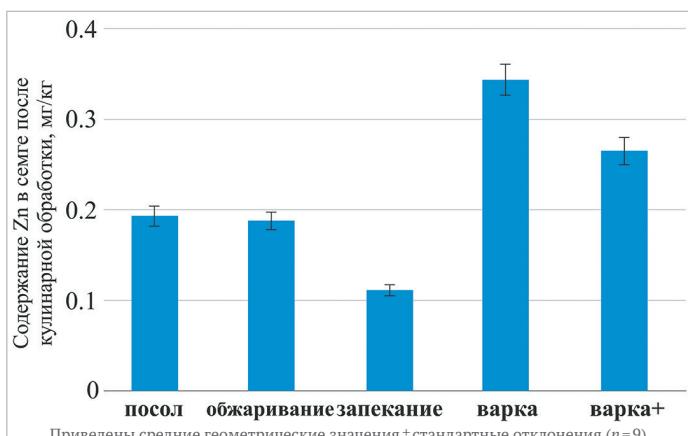


Рисунок 8. Содержание цинка в семге после приготовления
Figure 8. Content of zinc in Atlantic salmon after preparation

3.8. Медь

Семга является одним из наиболее богатых медью видов рыб, что повышает ее ценность как пищевого ресурса в Арктике [32–34]. В водных экосистемах, подверженных серьезной антропогенной нагрузке по неорганическим соединениям, рыба способна накапливать данный эссенциальный элемент в концентрациях, опасных для потребления человеком. Она обладает высоким уровнем биоаккумуляции в тканях, что может привести к различным нарушениям здоровья [33]. Избыток меди может блокировать активные центры ферментов, нарушая их функции и приводя к изменению метаболических процессов. Кроме того, высокая концентрация меди может вызывать окислительный стресс, повреждая клеточные мембранны и ДНК.

Исследования влияния различных термических методов кулинарной обработки пищевого сырья выявляли закономерность снижения уровня меди в биомассе [33]. Подобная закономерность выявлена и в нашей работе, особенно это характерно для варки (Рисунок 9). Наибольшие потери меди отмечены при посоле, что может быть связано с эффектом высыпания данного элемента в связи с большим содержанием хлорида натрия, используемого в данном

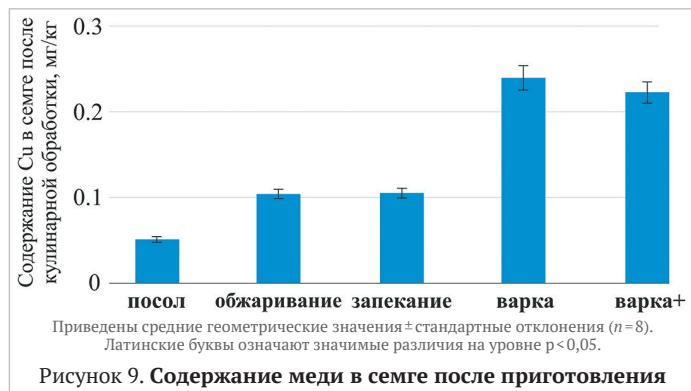


Рисунок 9. Содержание меди в семге после приготовления
Figure 9. Content of copper in Atlantic salmon after preparation

способе приготовления. Схожий эффект обнаружен в работе египетских исследователей при приготовлении мокро-соленого карпа с использованием 15 % раствора соли [29].

В вопросе сохранения эссенциальных элементов варка является предпочтительной в сравнении с другими способами [22]. В момент приготовления филе вода насыщает рыбу цинком, но из-за невысокой температуры, которой подвергается продукт, потери меди наименьшие. Обжаривание тоже может считаться подходящим для сохранения эссенциальных элементов способом, так как потери меди при нем не так велики, как при посоле, а концентрация цинка увеличивается в сравнении с контролем, в отличие от запекания.

4. Выводы

В ходе проведенного исследования было проанализировано влияние 4 способов кулинарной обработки филе семги, используемой в питании жителями Мезенского округа Архангельской области. Исходя из полученных результатов и информации о влиянии каждого из способов на анализируемые соединения, можно сделать выводы о наиболее предпочтительных способах приготовления рыбы. Обжаривание и запекание имеют схожие результаты изменения концентрации веществ, оба способа относительно хорошо поникают концентрации ртути, меди и мышьяка, на остальные вещества их влияние не так велико. Посол в связи с отсутствием термической обработки имеет либо очень сильное влияние на концентрацию вещества (ртуть, кадмий, медь), либо минимальное (свинец, мышьяк, цинк). Минимальное воздействие посола распространяется на два из четырех исследуемых токсичных веществ. Наиболее предпочтительным способом кулинарной обработки является варка семги. Этот способ приготовления существенно снижает концентрации токсичных веществ, но лучше всего сохраняет в рыбе эссенциальные элементы (цинк и медь). Важно отметить, что при варке большое количество таких токсичных веществ, как мышьяк и свинец, переходит в бульон. Поэтому при высоком уровне этих элементов в исходной рыбе рекомендуется употреблять вареную рыбу отдельно от него. Эссенциальные вещества в бульоне тоже сохраняются, однако их количество не так велико относительно их концентрации непосредственно в филе семги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Генрих, Э. А., Торцев, А. М. (23–24 марта 2023). Результаты мониторинга нерестовой части популяции Атлантического лосося в низовьях р. Мезен. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Лососевые рыбы: биология, воспроизводство, промысел». Мурманск: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, 2023. [Genrikh, E. A., Tortsev, A. M. (March 23–24, 2023). Results of the monitoring of the spawning part of the Atlantic salmon population in the lower part of the Mezen River. Papers from the Russian National Scientific Conference "Salmonoids: biology, reproduction, fisheries". Murmansk: Polar Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, 2023. (In Russian)]
- Комелина, Н. Г. (2023). Промысловые обычай жителей Зимнего берега Белого моря: по архивным материалам 1930-х гг. и экспедиционным записям 2007–2019 гг. Фольклор: структура, типология, семиотика, 6(1), 93–138. [Komelina N. G. (2023). Fishing customs of the inhabitants of the Winter Coast of the White Sea. Based on archival materials of the 1930s and expedition records 2007–2019. Folklore: Structure, Typology, Semiotics, 6(1), 93–138. (In Russian)].
- Шкунов, В. Н. (2025). Промысел семги на Русском Севере в XIX в. In Situ, 9, 17–21. [Shkunov, V. N. (2025). Salmon fishing in the Russian North in the 19th. In Situ, 9, 17–21. (In Russian)]
- Скурихин, И. М., Тутельян, В. А. (2002). Химический состав российских пищевых продуктов. Москва: Де Ли прнт, 2002. [Skurikhin, I. M., Tutelyan, V. A. (2002). Chemical composition of Russian food products. Moscow: De Li print, 2002. (In Russian)]
- Brooks, K. M., Mahnken, C. V. W (2003). Interactions of Atlantic salmon in the Pacific Northwest environment: III. Accumulation of zinc and copper. *Fisheries Research*, 62(3), 295–305. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(03\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(03)00065-1)
- Гремыхих, В. А., Томилина, И. И., Комов, В. Т. (2007). Влияние кулинарной обработки на содержание ртути в рыбе. Гигиена и санитария, 6, 64–67. [Gremyachikh, V. A., Tomilina, I. I., Komov, V. T. (2007). The effect of cooking on the mercury content in fish. Hygiene and Sanitation, Russian Journal, 6, 64–67. (In Russian)]
- Devesa, V., Vélez D., Montoro, R. (2008). Effect of thermal treatments on arsenic species contents in food. *Food and Chemical Toxicology*, 46(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2007.08.021>
- Khristoforova, N. K., Tsygankov, V. Y., Boyarova, M. D., Lukyanova, O. N. (2015). Concentrations of trace elements in Pacific and Atlantic salmon. *Oceanology*, 55, 679–685. <https://doi.org/10.1134/S0001437015050057>
- Че, С. Н., Бакайтис, В. Й., Цапалова, И. Э. (2015). Влияние тепловой обработки на физические показатели и содержание тяжелых металлов в макромолекулах. Техника и технология пищевых производств, 2(37), 138–143. [Che, S. N., Bakaytis, V. I., Tsapalova, I. E. (2015). Influence of heat treatment on macro-
- molecular physical characteristics and the content of heavy metals in them. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2(37), 138–143. (In Russian)]
- Rajkowska-Mysiwiec, M., Pokorska-Niewiada, K., Witczak, A., Balcerzak, M., Ciecholowska-Juško, D. (2023). Health benefits and risks associated with element uptake from grilled fish and fish products. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 102(3), 957–964. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11429>
- Sheeshka, J., Murkin, E. (2002). Nutritional aspects of fish compared with other protein sources. *Comments on Toxicology*, 8(4–6), 375–397. <https://doi.org/10.1080/08865140215065>
- Захаров, А. Б., Мацук, М. А. (2015). Рыбы и рыбный промысел на реке Мезен: исторические аспекты. Вестник института биологии Кomi научного центра Уральского отделения РАН, 5(193), 34–41. [Zakharov, A. B., Matruk, M. A. (2015). Fish and fishery on the Mezen river. Historical aspects. Vestnik of Institute of Biology of Komi Scientific Center of Ural Branch of RAS, 5(193), 34–41. (In Russian)]
- Прусов, С. В. (2005). История рыболовства атлантического лосося в р. Поной, Кольский полуостров. Сборник статей «Лососевые рыбы Восточной Фенноскандии». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. [Prusov, S. V. (2005). History of Atlantic salmon fisheries in the Ponoi river, Rola peninsula. Proceedings "Salmonid fish of Eastern Fennoscandia". Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2005. (In Russian)]
- Торцев, А. М. (2020). Регулирование промысла лосося атлантического (семги) на реке Северная Двина. Известия КПТУ, 58, 49–61. [Tortsev, A. M., Stednov, I. I., Chuprov, D. V. (2020). Regulatory activities of Atlantic salmon fishery in the North Dvina River. KSTU News, 58, 49–61. (In Russian)]
- Черемухина, Л. А. (1992). Рыбный бульон. Глава в книге: Северная кухня. Архангельск: Северо-западное книжное издательство, 1992. [Cheremukhina, L. A. (1992). Fish broth. Chapter in a book: Nordic cuisine. Arkhangelsk: North-Western Book Publishing House, 1992. (In Russian)]
- Филин, Ф. П. (1980). Словарь русских народных говоров. Ленинград: Наука. Ленинградское отделение, 1980. [Filin, F. P. (1980). Dictionary of Russian folk dialects. Leningrad: Nauka. Leningrad branch, 1980. (In Russian)]
- Shapiro, S. S., Wilk, M. B., Chen, H. J. (1968). A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1343–1372. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480932>
- Sobolev, N., Nieboer, E., Aksenen, A., Sorokina, T., Chashchin, V., Ellingsen, D. G. et al. (2019). Concentration dataset for 4 essential and 5 non-essential elements in fish collected in Arctic and sub-Arctic territories of the Nenets Autonomous and Arkhangelsk regions of Russia. *Data in Brief*, 27, Article 104631. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104631>
- Arroyo-Abad, U., Pfeifer, M., Mothes, S., Stärk, H.-J., Piechotta, C., Mattusch, J. et al. (2016). Determination of moderately polar arsenolipids and mercury specia-

- tion in freshwater fish of the River Elbe (Saxony, Germany). *Environmental Pollution*, 208(Part B), Article 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.10.015>
20. Sorokina, T. Y. (2022). Pollution and monitoring in the Arctic. Chapter in a book: Global Arctic. Springer, Cham., 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81253-9_12
21. Jensen, I.-J., Eilertsen, K.-E., Otnæs, C. H. A., Mæhre, H. K., Ellevoll, E. O. (2020). An update on the content of fatty acids, dioxins, PCBs and heavy metals in farmed, escaped and wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in Norway. *Foods*, 9(12), Article 1901. <https://doi.org/10.3390/foods9121901>
22. Kazemi, A., Esmaeilbeigi, M., Ansari, A., Ghanavati, A., Mohammadzadeh, B. (2022). Alterations and health risk assessment of the environmental concentration of heavy metals in the edible tissue of marine fish (*Thunnus tonggol*) consumed by different cooking methods. *Regional Studies in Marine Science*, 53, Article 102361. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102361>
23. Sorokina, T., Sobolev, N., Belova, N., Aksenov, A., Kotsur, D., Trofimova, A. et al. (2022). Diet and blood concentrations of essential and non-essential elements among rural residents in Arctic Russia. *Nutrients*, 14(23), Article 5005. <https://doi.org/10.3390/nu14235005>
24. Zhang, C., Miao, X., Du, S., Zhang, T., Chen, L., Liu, Y. et al. (2023). Effects of culinary procedures on concentrations and bioaccessibility of Cu, Zn, and As in different food ingredients. *Foods*, 12(8), Article 1653. <https://doi.org/10.3390/foods12081653>
25. Bernard, B. P., Becker, C. E. (1988). Environmental lead exposure and the kidney. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 26(1–2), 1–34. <https://doi.org/10.3109/15563658808995395>
26. Горбачев, А. Л. (2025). Микроэлементный статус и здоровье жителей северных регионов: научный обзор. *Экология человека*, 32(4), 225–238. [Gorbachev, A. L. (2025). Trace element status and health of Northern populations: A scientific review. *Human Ecology*, 32(4), 225–238.] <https://doi.org/10.17816/humeco646046>
27. Türkmen, A., Türkmen, M., Tepe, Y., Akyurt, I. (2005). Heavy metals in three commercially valuable fish species from İskenderun Bay, Northern East Mediterranean Sea, Turkey. *Food Chemistry*, 91(1), 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.008>
28. Abdallah, M. A. M. (2008). Trace element levels in some commercially valuable fish species from coastal waters of Mediterranean Sea, Egypt. *Journal of Marine Systems*, 73(1–2), 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.09.006>
29. Abbas, M. M. M., Shehata, S. M., Talab A. S., Mohamed, M. H. (2022). Effect of traditional processing methods on the cultivated fish species, Egypt. Part I. Mineral and heavy metal concentrations. *Biological Trace Element Research*, 200, 2391–2405. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02840-w>
30. Tsuda, T., Inoue, T., Kojima, M., Aoki, S. (1995). Market basket and duplicate portion estimation of dietary intakes of cadmium, mercury, arsenic, copper, manganese, and zinc by Japanese adults. *Journal of AOAC International*, 78(6), 1363–1368.
31. Allen-Gil, S. M., Martynov, V. G. (1995). Heavy metal burdens in nine species of freshwater and anadromous fish from Pechora River, northern Russia. *The Science of Total Environment*, 160/161, 653–659. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)93634-t](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)93634-t)
32. Ahmed, A. S. S., Sultana, S., Habib, A., Ullah, H., Musa, N., Hossain, M. B. et al. (2019). Bioaccumulation of heavy metals in some commercially important fishes from a tropical river estuary suggests higher potential health risk in children than adults. *PLOS One*, 14(10), Article e0219336. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219336>
33. Bastias, J. M., Balladares, P., Acuña, S., Quevedo, R., Muñoz, O. (2017). Determining the effect of different cooking methods on the nutritional composition of salmon (*Salmo salar*) and chilean jackmackerel (*Trachurus murphyi*) fillets. *PLOS One*, 12(7), Article e0180993. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180993>
34. Kokkali, M., Sveen, L., Larsson, T., Krasnov, A., Giakovakis, A., Sweetman, J. et al. (2023). Optimisation of trace mineral supplementation in diets for Atlantic salmon smolt with reference to holistic fish performance in terms of growth, health, welfare, and potential environmental impacts. *Frontiers in Physiology*, 14, Article 1214987. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1214987>

СВЕДЕНИЯ О БИБЛИОГРАФИИ

Принадлежность к организациям

Виров Аркадий Игоревич — лаборант-исследователь, лаборатория арктического биомониторинга, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17
E-mail: a.virov@narfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9734-356X>
* автор для контактов

Аксенов Андрей Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, профессор, кафедра биологии, экологии и биотехнологии, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17
E-mail: a.s.aksenov@narfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1013-1357>

Сорокина Татьяна Юрьевна — кандидат юридических наук, заведующий лабораторией арктического биомониторинга, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17
E-mail: t.sorokina@narfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4873-8747>

Критерии авторства

Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за plagiat.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR INFORMATION

Affiliation

Arkadiy I. Virov, Laboratory Assistant, Arctic Biomonitoring Laboratory, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
17, Naberezhnaya Severnoy Dvini, 163002, Arkhangelsk, Russia
E-mail: a.virov@narfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9734-356X>

* corresponding author

Andrey S. Aksenov, Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor, Department of Biology, Ecology and Biotechnology, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
17, Naberezhnaya Severnoy Dvini, 163002, Arkhangelsk, Russia
E-mail: a.s.aksenov@narfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1013-1357>

Tatiana Yu. Sorokina, Candidate of Law Sciences, Head of the Arctic Biomonitoring Laboratory, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
17, Naberezhnaya Severnoy Dvini, 163002, Arkhangelsk, Russia
E-mail: t.sorokina@narfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4873-8747>

Contribution

The authors has the sole responsible for writing the manuscript and es responsible levant for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.