

РУМЯНЦЕВА ОЛЬГА ЮРЬЕВНА

**РОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И РАЦИОНА В НАКОПЛЕНИИ РТУТИ У
НАСЕЛЕНИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ (НА ПРИМЕРЕ ВОЛОГОДСКОЙ
ОБЛАСТИ)**

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Череповец

2025

Работа выполнена на кафедре биологии Института биологии и спорта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Череповецкого государственного университета» (ЧГУ).

Научный руководитель:

доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физиологии и токсикологии водных животных ФГБУН Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук (пос. Борок)
Комов Виктор Трофимович

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук, профессор, академик РАН, руководитель научного направления, главный научный сотрудник лаборатории экологической биохимии Института биологии ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (г. Петрозаводск)
Немова Нина Николаевна

доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией биологической и неорганической химии Института физиологии природных адаптаций ФГБУН Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (г. Архангельск)
Бичкаева Фатима Артемовна

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Иркутск)

Защита состоится «_____» 2026 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.340.05 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022 г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Институт биологии и биомедицины.

Email: dis212.166.12@gmail.com

Факс: (831) 462-30-85

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: <https://diss.unn.ru/files/2025/1614/diss-Rumyantseva-1614.pdf>, с авторефератом – в сети Интернет на сайте ВАК России по адресу: <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан «_____» 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук



Д.Е. Гаврилко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ртуть – высокотоксичный металл, представляющий опасность для всех живых организмов (Clarkson, Magos, 2006; Dietz et al., 2012). Ртуть обладает уникальными физико-химическими свойствами, определяющими ее высокое сродство к органическим соединениям, что способствует ее эффективному накоплению в пищевых сетях по сравнению с другими тяжелыми металлами (UNEP, 2003).

В окружающую среду ртуть поступает из природных (выветривание горных пород, извержение вулканов, естественная дегазация с поверхности мирового океана) и антропогенных источников (сжигание ископаемого топлива, производство цветных металлов и цемента, кустарная и мелкомасштабная добыча золота) (UNEP, 2008; UNEP, 2013; Sundseth et al., 2017). Наиболее широко используется представление о трех формах ртути: 1) элементарная ртуть (Hg^0), которая в зависимости от условий может быть металлической или газообразной; 2) окисленная двухвалентная ртуть (Hg^{2+}); 3) органическая форма, представленная преимущественно метилртутью ($MeHg$).

Особенности биогеохимического цикла ртути приводят к тому, что высокие концентрации ртути (в первую очередь в форме метилртути) обнаруживаются в организме рыб, обитающих в водоемах, расположенных на значительном расстоянии от промышленных предприятий (Cohen et al., 2016; Sprovieri et al., 2016, 2017; Travnikov et al., 2017). Кроме того, высокие концентрации ртути зарегистрированы в органах и тканях рыб из кислых озер (рН воды <5,0) разных регионов мира, включая Северо-Запад России (Haines et al., 1995; Nemova et al., 2000; Spry, Wiener, 1991).

Основным источником биодоступной ртути в организме человека является употребление в пищу рыбы, морепродуктов и, в меньшей степени, риса (WHO, 1990; Rice et al., 1997; EFSA, 2018; Du et al., 2020). Метилртуть составляет 80–90% от общей ртути, содержащейся в мышечной ткани рыб (Dusek et al., 2005; US EPA 2010; Li, Cai, 2013; Lavoie et al., 2013; Finley et al., 2016). В кишечном тракте человека усваивается до 95% метилртути, содержащейся в мышцах рыб (WHO, 2007). Далее ртуть с током крови перераспределяется по всем органам и тканям, включая волосы (Clarkson, Magos, 2006).

Изотопный состав азота и углерода тканей животных, в том числе и человека, является интегральным показателем, отражающим особенности их питания. Изотопный состав углерода позволяет определить источники углерода для организмов на нижних трофических уровнях. Изотопный состав азота различается у животных на разных трофических уровнях – с увеличением уровня происходит обогащение тяжелым изотопом.

Вологодская область (Северо-Запад России) – это континентальный район, который расположен на Восточно-Европейской древней платформе, в северной части Русской плиты (Геология СССР, 1963). Месторождения и рудопроявления ртути (золото-редкометальная, свинец-ртуть редкометальная и сурьма-ртутная ассоциации) на территории области отсутствуют (Металлогенез ртути, 1976; Янин, 2004). Однако здесь расположен город Череповец, в котором функционируют предприятия черной металлургии и химического комплекса.

Регион характеризуется густой сетью рек и озер, которые служат ресурсной базой для рыболовства. Здесь традиционно сохраняется высокий уровень потребления жителями дикой рыбы. Так, если в России в 2017 году употребление рыбы и рыбных продуктов составило в среднем 21,5 кг на человека, то в Вологодской области этот показатель составил 23,3 кг на человека (РОССТАТ, 2017). На территории Вологодской области более 30 лет исследуются особенности содержания и распределения ртути в биотических и абиотических компонентах водных и наземных экосистем (Haines et al., 1995; Komov et al., 2004; Khabarova et al., 2018; Ivanova et al., 2020). Часто отмечается высокое содержание ртути в мышцах рыб местных водоемов, при этом вопрос поступления ртути в организмы населения недостаточно исследован.

Работы по оценке уровней ртути у населения с использованием волос в качестве биомаркера на территории России до сих пор носят фрагментарный характер (Shuvalova et al., 2018; Aleksina, Komov, 2020). При этом исследования взаимосвязи между содержанием ртути в организме людей и особенностями рациона питания, основанные на методах трофической экологии, в мире встречаются крайне редко.

Цель работы – определить влияние экологических факторов и рациона на поступление ртути в организм человека по содержанию металла в волосах населения Северо-Запада России (на примере Вологодской области).

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Определить содержание ртути в волосах демографических групп населения, проживающих в городской и сельской местности на территории Вологодской области.

2. Определить содержание ртути в волосах разных демографических групп населения, а также сравнить ее концентрации между курящими и некурящими людьми.

3. Исследовать влияние частоты потребления рыбы на содержание ртути в волосах жителей Вологодской области.

4. Определить зависимость содержания ртути и изотопов азота и углерода в волосах демографических групп населения, проживающих в городской и сельской местности.

5. Определить изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) волос жителей Вологодской области с разным содержанием ртути и разным рационом питания.

Научная новизна. Впервые исследовано содержание ртути и изотопный состав углерода и азота в волосах жителей Вологодской области – региона с разнообразными экологическими и социальными факторами. Выявлены экологические, географические и социальные факторы, определяющие уровни поступления металла в организм человека. Определены территории и группы населения, для которых характерны повышенные концентрации ртути в волосах. Впервые в России с помощью метода изотопной масс-спектрометрии исследована взаимосвязь между содержанием ртути в волосах и особенностями питания населения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Данные об уровне содержания ртути в волосах большой выборки населения Вологодской области вносят вклад в изучение биогеохимической миграции металла в экосистемах умеренного пояса Северного полушария. Информация о содержании ртути и изотопном составе азота и углерода в волосах населения Вологодской области может использоваться при организации мониторинговых исследований на территориях со сходными природно-климатическими условиями. Результаты работы могут найти широкое применение при разработке рекомендаций для снижения негативного воздействия ртути на здоровье человека и окружающую среду Вологодской области. Полученные данные могут использоваться средствами массовой информации для повышения осведомленности населения о существующих рисках, связанных с ртутным воздействием.

Материалы диссертации могут быть включены в курсы лекций и учебные пособия по специальностям «Экология», «Токсикология», «Социальная экология», «Безопасность жизнедеятельности» в средне-специальных и высших учебных заведениях. Результаты работы легли в основу учебного пособия «Зоология и новые методы исследования», 2023 г.

Положения, выносимые на защиту:

1. Содержание ртути в волосах населения Вологодской области варьирует в широком диапазоне концентраций и отличается у людей, проживающих в разных геоморфологических областях региона с разными экологическими параметрами. Максимальные значения отмечены в западных районах, для которых характерны выпуклый рельеф, высокие коэффициенты заболоченности и озёрности, минимальные – в промышленно-административном центре, промежуточные – в восточных районах (холмистая равнина с хорошо развитой речной сетью). Концентрация ртути в волосах положительно коррелирует с возрастом обследованных независимо от места проживания.

2. Рыба, употребляемая в пищу, является основными источником поступления ртути в организм людей, проживающих на территории Вологодской области. Уровень ртути зависит от частоты включения рыбы в регулярный рацион.

3. В волосах людей, у которых рыба входит в основу рациона, содержится больше тяжелого изотопа азота, чем в волосах людей, редко употребляющих рыбу в пищу. Концентрация ртути в волосах положительно коррелирует с изотопным составом азота.

Соответствие паспорту научной специальности. Результаты исследования соответствуют шифру специальности 1.5.15. Экология (биологические науки), конкретно направлению исследований: 13. Экология человека – биологические аспекты воздействия окружающей среды на человека (на уровне индивидуума и популяции).

Степень достоверности и аprobация результатов. Степень достоверности результатов исследований подтверждается большой выборкой – образцы волос для обработки были взяты у 1643 человек. В работе использованы принятые в мировой практике методы сбора и пробоподготовки. При анализе материала на аналитическом оборудовании были использованы международные стандарты. Полученные результаты подвергнуты статистической обработке с применением адекватных поставленной цели методов.

Результаты диссертационной работы представлены на: всероссийских и международных научно-практических конференциях: IV Международный симпозиум «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты», Череповец, 2025; 16-я Международная конференция «Ртуть как глобальный загрязнитель» (ICMGP 2024), Кейптаун, ЮАР, 2024; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023» МГУ, Москва, 2023; VII Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего-наука молодых», Орел, 2023; VIII Всероссийская конференция по водной экотоксикологии, посвященной 85-летию со дня рождения Бориса Александровича Флёрова, ИБВВ РАН, Борок, 2023; Третий международный симпозиум «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты», Иркутск, 2022; 7-я Всероссийская научная конференция «Проблемы экологии Волжского бассейна. Волга-2022», Нижний Новгород, 2022.

Личный вклад соискателя. Автор непосредственно участвовал во всех этапах исследования. Самостоятельно сформулировал цель и задачи исследования, составил анкеты, собрал информацию и биологический материал у участников исследования, занимался пробоподготовкой материала к анализу и непосредственно химико-аналитическими работами, (содержание ртути и изотопный состав азота и углерода), статистической обработкой данных, обсуждением и интерпретацией полученных результатов, а также подготовкой научных публикаций и докладов на конференциях. Выносимые на защиту результаты и положения получены лично автором.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 8 статей в журналах, индексируемых аналитическими базами данных Web of Science, Scopus, ВАК, 5 публикаций в материалах конференций и не входящие в перечень ВАК, 1 учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, выводов, списка литературы, содержащего 195 источников, в том числе 167 - на иностранных языках. Диссертационная работа изложена на 146 страницах, приведены 16 таблиц, 49 рисунков.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность и признательность научному руководителю доктору биологических наук, профессору Комову Виктору Трофимовичу за ценные советы и помошь на всех этапах диссертационной работы. Также автор выражает благодарность студентам и сотрудникам кафедры биологии Череповецкого государственного университета за поддержку, участие в исследовании и помошь в организации сбора материала для диссертационной работы. Автор признателен кандидату биологических наук, доценту Ивановой Елене Сергеевне за мотивацию и помошь, оказанную при работе над диссертацией, кандидату биологических наук, доценту Поддубной Надежде Яковлевне за

советы в обсуждении результатов. Отдельная благодарность моей семье за поддержку и понимание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В главах 1.1, 1.2 представлены сведения о физико-химических свойствах ртути, ее природных и антропогенных источниках, содержании ртути в рыбе и рыбных продуктах, о волосах как биомаркере ртути в организме человека. Особое внимание уделено обзору возможных негативных последствий для организма человека при воздействии разных форм ртути. Рассмотрены изотопные методы анализа для оценки рациона человека.

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено на территории Вологодской области ($58^{\circ}27'$ и $61^{\circ}36'$ с. ш.; $34^{\circ}42'$ и $47^{\circ}10'$ в. д.), которая расположена на северо-востоке Восточно-Европейской равнины, в континентальной части таёжной зоны. Протяженность региона с севера на юг – 250–380 км, с запада на восток – 650 км, площадь территории составляет 145,7 тыс. км² (Природа, 2007). Значительные размеры региона определяют разнообразие природных экологических факторов. Неоднородность рельефа территории обуславливает перераспределение тепла и влаги в зависимости от высоты, ориентации и крутизны склонов. С запада на восток области средняя годовая температура понижается (от +2,5 до +1,5°C), количество осадков уменьшается (разница в годовых суммах достигает 160–170 мм) (Природа, 2007).

На территории региона выделяют две геоморфологические области, отличающиеся гидрографическими параметрами. Граница между западной и восточной геоморфологическими областями проходит по западному флангу полосы низин, прилегающих к озёрам Лача, Воже, Кубенское и далее через бассейн реки Лежи. Молодой хорошо сохранившийся ледниковый рельеф с разнообразными моренными грядами и холмами при сравнительно слабо развитой речной сети в западной геоморфологической области обуславливает широкое распространение здесь озёр и создает благоприятные условия для развития болот. В восточной геоморфологической области преобладают волнистые и увалистые моренные равнины с хорошо развитой речной сетью, в связи с чем озёра и болота не получили здесь широкого распространения (Кичигин, 2007). Различия между западной и восточной геоморфологическими областями также проявляются в разнице абсолютных и относительных высот, изменении коэффициента озёрности (до 10% в западных районах и менее 0,2% в восточных районах) и степени заболоченности территории (20–50% в западных районах, менее 1% в восточных районах).

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Сбор материала

Исследования проводили с 2016 по 2023 год на территории Вологодской области. Программа научного исследования обсуждалась и одобрена Комиссией по биоэтике Череповецкого государственного университета и Департаментом здравоохранения Вологодской области (№ 2-1/55 от 18.01.2019). Всего было обследовано 1643 человека (502 мужчин и 1135 женщин) возрастом от 4 месяцев до 84 лет из 24 районов Вологодской области. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения пряди волос (толщиной несколько мм), брали с затылочной части головы (ВОЗ, 2008). Образцы упаковывали в индивидуальные бумажные конверты, которые хранили в полиэтиленовом пакете при комнатной температуре.

Каждый респондент заполнял анкету, в которой указывал: пол, возраст, место проживания, рацион питания, частоту и объём (грамм/месяц) потребления рыбы (или рыбных продуктов), отношение к курению. Все участники подписывали добровольное информированное согласие на участие в исследовании в соответствии с Кодексом этики

Всемирной медицинской ассоциации (Хельсинкская декларация) (WMA, 2024). Для участников младше 18 лет запрашивали согласие родителей на участие в исследовании.

Вся выборка собранных проб волос была разделена на три группы: население промышленно-административного центра региона – город Череповец, город Вологда и два ближайших района: Шекснинский и Череповецкий, жители, которых работают на основных промышленных предприятиях региона (далее по тексту, в иллюстрациях и таблицах указано как городское население); сельское население восточной части области (Кичменгско-Городецкий, Бабушкинский, Никольский, Великоустюгский, Тарногский, Верховажский, Сямженский, Грязовецкий, Тотемский районы); сельское население западной части области (Вытегорский, Белозерский, Важкинский, Вожегодский, Кадуйский, Харовский, Сокольский, Бабаевский, Чагодощенский, Устюженский, Кирилловский районы).

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ, 1963) рекомендует разделять выборку на следующие возрастные группы: до 18 лет – дети, 18–29 – молодые, 30–44 – зрелый возраст, 45–59 – средний возраст, 60–74 – пожилой, 75–89 – старческий. В данной работе общая выборка была разделена на 4 группы: 1 – до 18 лет, 2 – 18–29 лет, 3 – 30–44 лет, 4 – старше 45 лет (при сравнении были объединены в одну группы категории средний возраст, пожилой и старческий из-за недостаточного количества выборки в данных возрастных категориях).

3.2. Определение ртути

Содержание ртути в волосах определяли методом пиролиза с помощью атомно-адсорбционного спектрометра РА-915М, оснащенного пиролитической приставкой ПИРО-915+ (ООО «Люмекс», Санкт-Петербург, Россия). Метод не требует какой-либо предварительной пробоподготовки. Точность анализа контролировали по сертифицированным стандартным образцам мышечной ткани рыбы DORM-4 (концентрация ртути $0,412 \pm 0,036$ мг/кг), печени акулы DOLT-5 (концентрация ртути $0,44 \pm 0,18$ мг/кг) Национального исследовательского совета Канады (NRCC) и волос человека NIMD-1 (концентрация ртути $0,794 \pm 0,05$ мг/кг) Национального института болезни Минамата, Япония. Различия между повторностями составили в среднем 8,0% (диапазон 0,2–11,5%).

3.3. Определение изотопного состава углерода и азота

Анализ изотопного состава проводили на масс-спектрометре Thermo Delta V Advantage с газовым интерфейсом ConFlo IV и элементном анализаторе EA Isolink Flash IRMS. Перед анализом образцы волос промывали в растворе хлороформ-метанол (2:1) для удаления липидов (O'Connell et al., 2001). В качестве изотопных стандартов использовали L-глутаминовую кислоту USGS-40 и Тибетский человеческий волос USGS-42 (Геологическая служба США). Точность измерений $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ была в пределах $\pm 0,2\text{‰}$ (SD). Изотопный состав каждого образца определяли в двухкратной повторности.

Изотопный состав принято выражать в относительных единицах ($\delta, \text{‰}$), показывающих отклонение изотопного состава исследуемого материала от принятого международного стандарта. Стандарт для $\delta^{13}\text{C}$ – белемнит Vienna PeeDee (VPDB), а для $\delta^{15}\text{N}$ – атмосферный азот. Изотопный состав δ обычно выражается в промилле (‰) и рассчитывается по следующей формуле (1):

$$\delta^n\text{E} (\text{‰}) = (R_{\text{проба}}/R_{\text{стандарт}} - 1) * 1000, \quad (1)$$

Е – элемент, n – масса более тяжелого изотопа, R – молярное соотношение тяжелого и легкого изотопов в анализируемом материале и в стандарте.

3.4. Расчет ежедневного поступления ртути в организм человека на массу тела

На основании формулы Всемирной организацией здравоохранения (UNEP, WHO, 2008), мы рассчитали для каждого участника исследования с какой концентрацией ртути рыба поступает в его организм:

$$C_m = \frac{A * BW}{CR}, \quad (2)$$

C_m – концентрация ртути в рыбе, мкг/кг;

А – ежедневное поступление ртути в организм человека с известной концентрацией ртути в волосах, мкг/кг массы тела в день;

BW – масса тела, усредненное 70 кг;

CR –потребление рыбы кг/день, согласно опроснику.

Данные расчеты усреднили и привели для каждой изучаемой выборки: населения промышленно-административного центра, населения восточных и населения западных районов области. Концентрация ртути в рыбе оценивалась по нашим и литературным данным (Иванова и др., 2018; Почкицкая и др., 2018; Ivanova et al., 2023).

3.5. Статистическая обработка данных

Соответствие исследованных показателей нормальному распределению оценивали с помощью тестов Shapiro–Wilk test и Kolmogorov–Smirnov test. Для сравнения двух независимых выборок использовали непараметрический U-критерий Манна–Уитни (Mann–Whitney U test), для трёх и более независимых выборок – H-критерий Краскала–Уоллиса (Kruskal–Wallis H-test), для сравнения выборок также использовали χ^2 по Пирсону.

Выявленные различия принимали за статистически значимые при значениях уровня значимости $p < 0,05$. Корреляционную связь между исследованными параметрами оценивали с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена (Spearman's rank correlation coefficient). Корреляцию считали статистически значимой при значениях уровня значимости $p < 0,05$ (Sokal et al., 1995).

ГЛАВА 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РТУТИ В ВОЛОСАХ ЖИТЕЛЕЙ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

4.1. Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения разных районов области

Концентрации ртути в волосах жителей Вологодской области варьируют в широких пределах: от 0,001 мг/кг до 7,640 мг/кг, при этом среднее значение составляет – (среднее \pm SE) $0,445 \pm 0,018$ мг/кг, медианное значение – медиана \pm (Q25–Q75) – 0,220 (0,080–0,511) мг/кг (таблица 1).

Таблица 1 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения Вологодской области

Территория исследования	Mean	Median	SD	SE	Min–Max	Различия
Вологодская область (n = 1643)	0,445	0,220	0,714	0,018	0,001–7,640	
Городское население (n = 958)	0,307	0,169	0,447	0,014	0,001–4,056	a
Сельское население восточных районов (n = 327)	0,367	0,235	0,409	0,023	0,001–3,548	b
Сельское население западных районов (n = 358)	0,884	0,474	1,185	0,063	0,001–7,640	c

Примечание. Здесь и далее в таблицах: n – число наблюдений; Mean – среднее значение; Median – медиана; SD – стандартное отклонение, SE – ошибка среднего; Min – Max – минимальное и максимальное значение выборки; a, b, c – буквенные индексы указывают на статистически значимые различия, при $p < 0,05$

Содержание ртути в волосах людей, проживающих в западных районах Вологодской области, выше в несколько раз, чем у городского населения и населения восточных районов (рисунок 1).

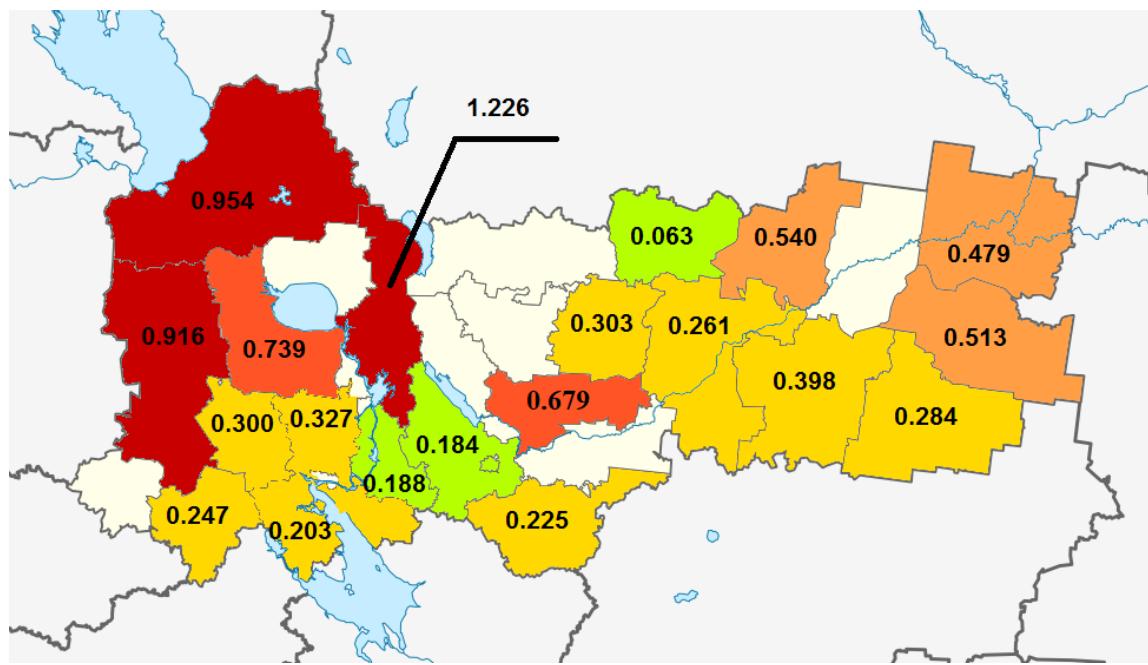


Рисунок 1 – Карта-схема распределения концентраций ртути (мг/кг) в волосах жителей различных районов Вологодской области

4.2. Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения различных демографических групп

Различий по содержанию ртути в волосах между мужчинами и женщинами не установлено. Среднее содержание ртути в волосах мужчин составляет $0,470 \pm 0,037$ мг/кг, в волосах женщин – $0,433 \pm 0,019$ мг/кг. При этом различий по содержанию ртути в волосах между мужчинами и женщинами из сельской местности не обнаружено, в то время как в городах содержание ртути в волосах у женщин статистически значимо выше, чем у мужчин (таблица 2).

Таблица 2 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах мужчин и женщин, проживающих в различных районах Вологодской области

Пол	Mean	Median	SD	SE	Min–Max	Различия
Вологодская область						
Мужчины (n = 502)	0,470	0,197	0,832	0,037	0,001–7,552	a
Женщины (n = 1135)	0,433	0,225	0,657	0,019	0,001–7,640	a
Городское население						
Мужчины (n = 271)	0,267	0,115	0,432	0,026	0,001–3,093	a
Женщины (n = 684)	0,321	0,181	0,452	0,017	0,001–4,056	b
Сельское население восточных районов						
Мужчины (n = 123)	0,384	0,267	0,411	0,037	0,001–2,830	a
Женщины (n = 201)	0,356	0,221	0,411	0,029	0,001–3,548	a
Сельское население западных районов						
Мужчины (n = 108)	1,078	0,510	1,445	0,139	0,005–7,552	a
Женщины (n = 250)	0,801	0,470	1,046	0,066	0,001–7,640	a

Содержание ртути в волосах у людей из разных возрастных групп статистически значимо отличается и увеличивается с возрастом. Минимальные средние концентрации отмечены у детей в возрасте до 18 лет и в возрастной группе от 18–29 лет – $0,270 \pm 0,027$ мг/кг и $0,245 \pm 0,014$ мг/кг, соответственно. Промежуточные значения отмечены в волосах людей среднего возраста от 30–44 лет – $0,665 \pm 0,055$ мг/кг. Максимальные концентрации ртути зарегистрированы в волосах людей старше 44 лет – $0,875 \pm 0,053$ мг/кг (таблица 3).

Таблица 3 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения Вологодской области разных возрастных групп

Территория исследования	Mean	Median	SD	SE	Min–Max	Различия
Вологодская область						
До 18 лет (n = 455)	0,270	0,133	0,567	0,027	0,001–7,552	a
18–29 лет (n = 593)	0,245	0,147	0,335	0,014	0,001–4,003	a
30–44 лет (n = 275)	0,665	0,401	0,911	0,055	0,001–7,640	b
Старше 45 лет (n = 318)	0,875	0,574	0,952	0,053	0,320–1,065	c
Городское население						
До 18 лет (n = 292)	0,172	0,103	0,220	0,013	0,001–1,583	a
18–29 лет (n = 379)	0,209	0,127	0,287	0,015	0,001–2,879	a
30–44 лет (n = 151)	0,461	0,327	0,458	0,037	0,001–2,470	b
Старше 45 лет (n = 136)	0,700	0,456	0,775	0,066	0,001–4,056	b
Сельское население восточных районов						
До 18 лет (n = 76)	0,224	0,156	0,283	0,032	0,001–1,788	a
18–29 лет (n = 133)	0,258	0,175	0,264	0,023	0,001–1,378	a
30–44 лет (n = 52)	0,496	0,444	0,368	0,051	0,011–1,585	b
Старше 45 лет (n = 64)	0,653	0,570	0,607	0,076	0,005–3,548	b
Сельское население западных районов						
До 18 лет (n = 87)	0,640	0,298	1,135	0,122	0,001–7,552	a
18–29 лет (n = 81)	0,396	0,236	0,548	0,061	0,001–4,003	a
30–44 лет (n = 72)	1,215	0,702	1,500	0,177	0,001–7,640	b
Старше 45 лет (n = 118)	1,198	0,852	1,181	0,109	0,001–6,559	b

Содержание ртути в волосах жителей Вологодской области положительно коррелирует с их возрастом ($r_s = 0,435$, $p < 0,001$). Значения корреляции для городского населения – $r_s = 0,435$, $p < 0,001$, населения восточных – $r_s = 0,396$, $p < 0,001$ и западных районов – $r_s = 0,389$, $p < 0,001$ (рисунок 2).

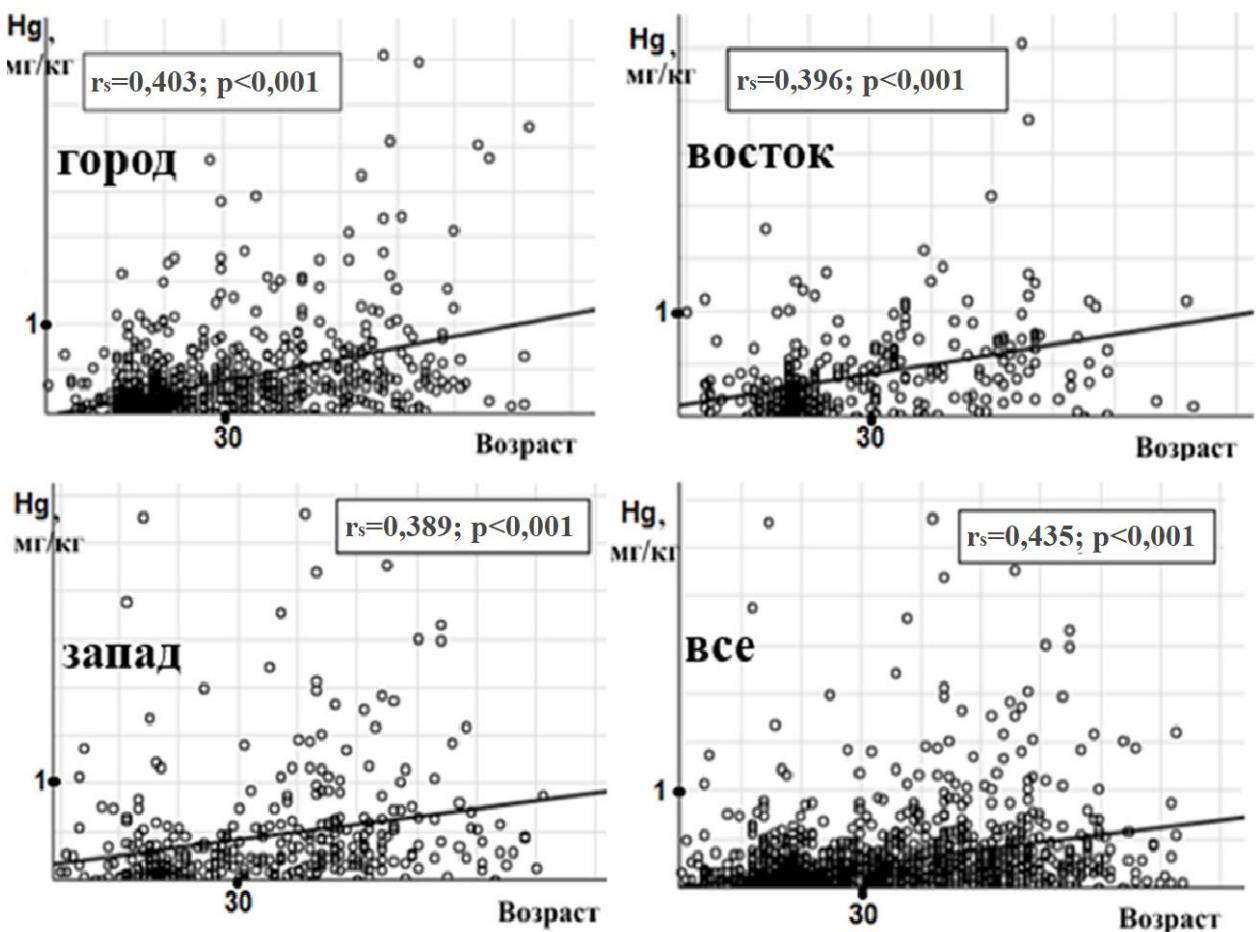


Рисунок 2 – Корреляционная связь между содержанием ртути (мг/кг) в волосах и возрастом

4.3. Связь содержания ртути в волосах населения с частотой употребления рыбы в пищу

Установлены различия по содержанию ртути в волосах людей с различной частотой встречаемости рыбы в рационе. Минимальные концентрации ($0,172 \pm 0,012$ мг/кг) отмечены в волосах людей, питающихся рыбой реже 1 раза в месяц. Более высокие концентрации отмечены в волосах людей, у которых рыба появляется в рационе от 1–2 раза в месяц до 1 раза в неделю ($0,409 \pm 0,025$ мг/кг и $0,555 \pm 0,032$ мг/кг, соответственно). Максимальные концентрации отмечены в волосах населения, употребляющего рыбу чаще одного раза в неделю ($0,995 \pm 0,105$ мг/кг) (таблица 4).

Таблица 4 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения Вологодской области с разной частотой потребления рыбы в рационе питания

Частота потребления рыбы в рационе питания	Mean	Median	SD	SE	Min–Max	Различия
Вологодская область						
Менее 1 раза в неделю (n = 411)	0,172	0,096	0,235	0,012	0,001–2,339	a
1–2 раза в месяц (n = 665)	0,409	0,221	0,637	0,025	0,001–6,413	b
1 раз в неделю (n = 390)	0,555	0,351	0,637	0,032	0,001–4,419	c
Несколько раз в неделю (n = 166)	0,995	0,549	1,346	0,105	0,001–7,640	d

Городское население						
Менее 1 раза в неделю (n = 265)	0,139	0,077	0,178	0,011	0,001–1,130	a
1–2 раза в месяц (n = 419)	0,296	0,174	0,423	0,021	0,001–3,976	a
1 раз в неделю (n = 192)	0,410	0,280	0,477	0,034	0,001–3,050	b
Несколько раз в неделю (n = 80)	0,675	0,468	0,746	0,083	0,001–4,056	b
Сельское население восточных районов						
Менее 1 раза в неделю (n = 73)	0,162	0,101	0,178	0,021	0,001–1,008	a
1–2 раза в месяц (n = 107)	0,341	0,252	0,320	0,031	0,001–1,585	a
1 раз в неделю (n = 103)	0,448	0,342	0,403	0,040	0,005–2,110	b
Несколько раз в неделю (n = 40)	0,599	0,434	0,694	0,110	0,010–3,548	b
Сельское население западных районов						
Менее 1 раза в неделю (n = 73)	0,299	0,186	0,382	0,045	0,001–2,339	a
1–2 раза в месяц (n = 139)	0,804	0,461	1,064	0,090	0,001–6,413	a
1 раз в неделю (n = 95)	0,965	0,701	0,901	0,092	0,001–4,419	b
Несколько раз в неделю (n = 46)	1,897	1,140	2,023	0,298	0,011–7,640	b

Корреляционная связь между содержанием ртути и количеством употребляемой рыбы установлена как по всей выборке ($r_s = 0,427$, $p < 0,001$), так и по отдельности в городе ($r_s = 0,436$) и сельской местности на востоке ($r_s = 0,327$, $p < 0,001$) и западе ($r_s = 0,458$, $p < 0,001$) Вологодской области (рисунок 3).

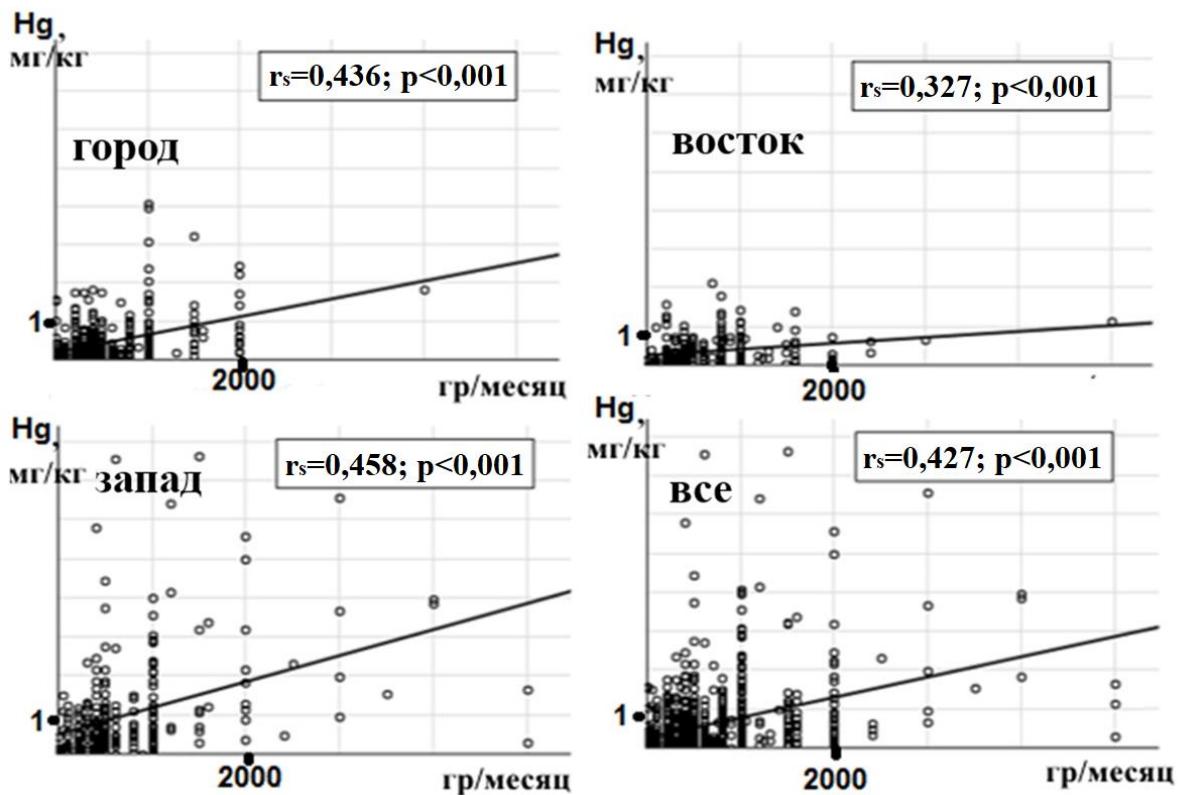


Рисунок 3 – Корреляционная связь между содержанием ртути в волосах и количеством потребляемой рыбы (гр/месяц)

4.4. Содержание ртути (мг/кг) в волосах курящих и некурящих людей

Установлены статистически значимые различия по содержанию ртути в волосах между курящими и некурящими людьми как по всей выборке, так и у городского и сельского населения из западных районов. При этом для населения из восточных районов области различий между курящими и некурящими не установлено.

ГЛАВА 5. СОДЕРЖАНИЕ РТУТИ (МГ/КГ) И СООТНОШЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ АЗОТА И УГЛЕРОДА (‰) В ВОЛОСАХ ЖИТЕЛЕЙ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

5.1. Соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах жителей в зависимости от места проживания (городского и сельского населения области) и связь с уровнем накопления ртути

Среднее значение величины $\delta^{15}\text{N}$ в волосах исследованных жителей Вологодской области составляет $9,82 \pm 0,03\text{‰}$. Значение $\delta^{15}\text{N}$ статистически значимо выше у сельских жителей западных районов области ($10,02 \pm 0,06\text{‰}$) по сравнению с населением восточных районов ($9,92 \pm 0,06\text{‰}$) и городским населением ($9,75 \pm 0,04\text{‰}$) (рисунок 4).

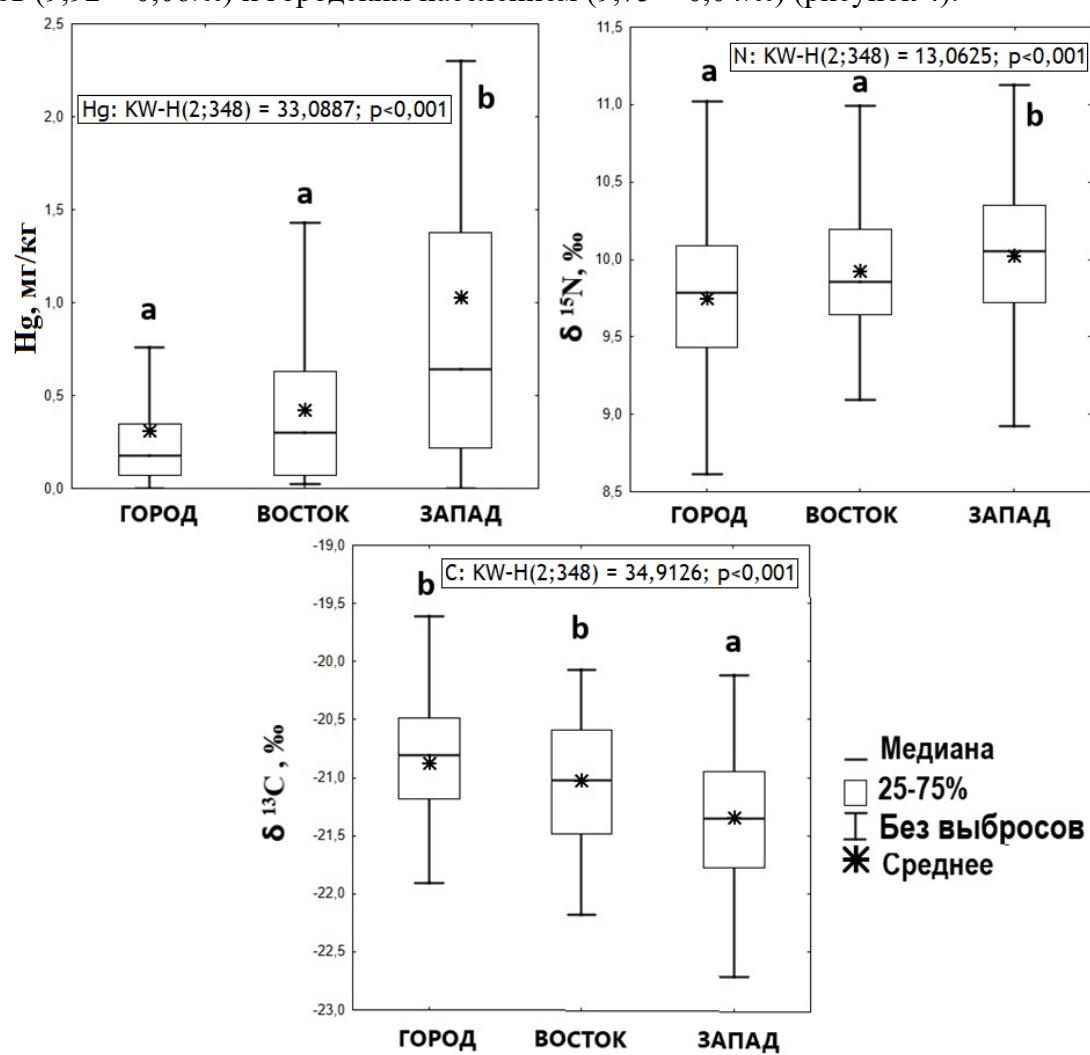


Рисунок 4 – Содержание ртути (мг/кг) и величин $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ (‰) в волосах населения Вологодской области. Буквенные индексы обозначают статистически значимые различия

Среднее значение величины $\delta^{13}\text{C}$ в волосах жителей Вологодской области составляет $-20,98 \pm 0,04\text{‰}$. В волосах городского населения содержится больше тяжелого изотопа

углерода ($\delta^{13}\text{C} = -20,87 \pm 0,04\text{\textperthousand}$) чем у сельского населения восточных и западных районов ($\delta^{13}\text{C} = -21,03 \pm 0,09\text{\textperthousand}$ и $-21,34 \pm 0,07\text{\textperthousand}$, соответственно). При этом для населения западных районов величина $\delta^{13}\text{C}$ статистически значимо ниже по сравнению с населением города и восточных районов.

Выявлена положительная корреляция между содержанием ртути в волосах и величиной $\delta^{15}\text{N}$ как для всех жителей Вологодской области, так у жителей отдельных районов. У городского населения установлена положительная корреляция между значением $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в волосах – $r_s = 0,422$, $p < 0,001$. У жителей восточных и западных районов области аналогичных корреляций не выявлено.

Содержание ртути в волосах населения Вологодской области положительно сопряжено с уровнем обогащения тяжелым изотопом азота и отрицательно – с уровнем обогащения тяжелым изотопом углерода. У жителей западных районов области отмечены самые высокие концентрации ртути и максимальные значения величины $\delta^{15}\text{N}$ в волосах. При этом величина $\delta^{13}\text{C}$ у них ниже по сравнению со значениями, выявленными в волосах жителей восточных районов и промышленно-административного центра (рисунок 5).

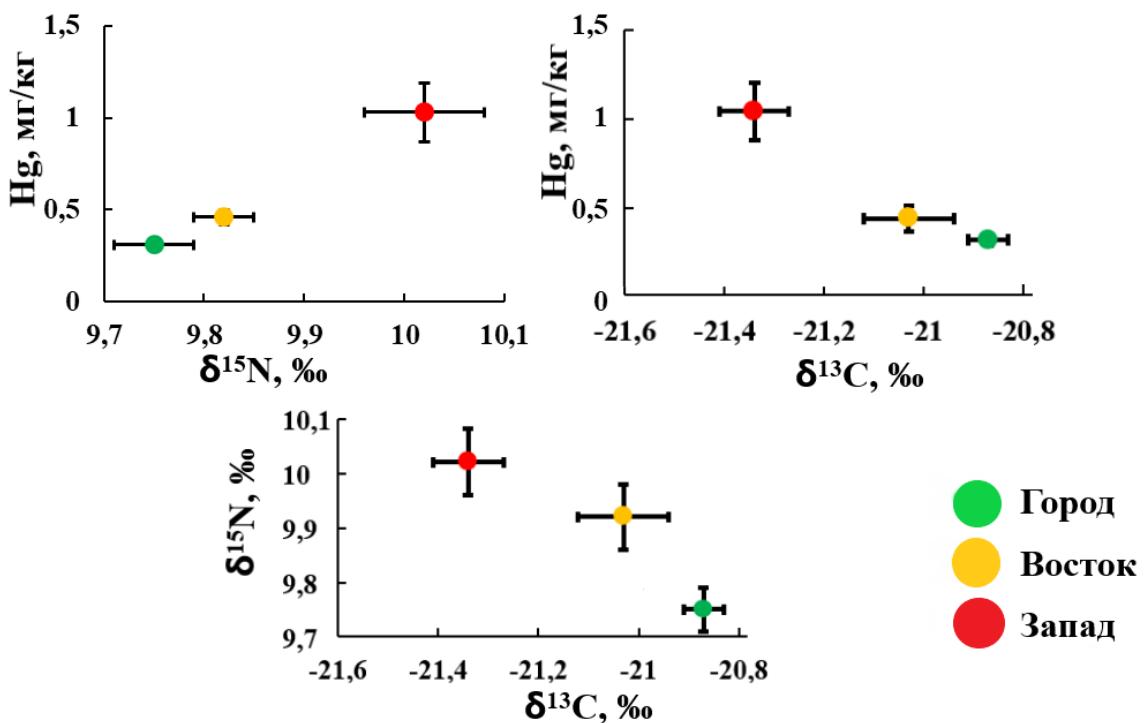


Рисунок 5 – Взаимосвязь между содержанием ртути (мг/кг), $\delta^{15}\text{N}$ (‰), $\delta^{13}\text{C}$ (‰) в волосах населения разных районов Вологодской области (планки погрешностей показывают ошибки среднего)

5.2. Соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах населения различных демографических групп и связь с уровнем накопления ртути

Значения величины $\delta^{15}\text{N}$ в волосах женщин статистически выше, чем у мужчин – $9,9 \pm 0,03\text{\textperthousand}$ и $9,57 \pm 0,07\text{\textperthousand}$, соответственно. При этом межполовых отличий в изотопном составе углерода не выявлено: у женщин $\delta^{13}\text{C} = -20,94 \pm 0,04\text{\textperthousand}$, у мужчин $\delta^{13}\text{C} = -21,08 \pm 0,09\text{\textperthousand}$.

С возрастом у жителей Вологодской области значение величины $\delta^{15}\text{N}$ в волосах статистически значимо повышается ($r_s = 0,230$; $p < 0,001$) и у жителей промышленно-

административного центра. Для сельского восточного и западного населения региона не установлено статистически значимой корреляции между возрастом и величиной $\delta^{15}\text{N}$.

С возрастом облегчается изотопный состав углерода в волосах населения Вологодской области ($r_s = -0,162$; $p = 0,002$) и волосах сельских жителей западных районов области ($r_s = -0,406$; $p < 0,001$). Корреляционная зависимость между возрастом и $\delta^{13}\text{C}$ не отмечена для городского и населения восточных районов области.

5.3. Влияние рациона питания жителей Вологодской области на изотопный состав азота, углерода (%) и содержание ртути (мг/кг) в волосах

Волосы у людей, питающихся рыбой несколько раз в неделю сильнее обогащены тяжелым изотопом азота ($\delta^{15}\text{N} = 10,09 \pm 0,09\%$) и содержат больше ртути по сравнению с волосами людей, у которых рыба в рационе встречается реже. Так, в волосах людей, которые питаются рыбой 1–2 раза в неделю величина $\delta^{15}\text{N}$ составила $9,94 \pm 0,05\%$, у тех, кто питается рыбой 1–2 раза в месяц – $9,87 \pm 0,04\%$. Минимальные значения отмечены в волосах людей, которые питаются рыбой реже одного раза в месяц – $\delta^{15}\text{N} = 9,56 \pm 0,07\%$.

В волосах людей, употребляющих рыбу в пищу несколько раз в неделю ($-21,18 \pm 0,09\%$), изотопный состав углерода легче по сравнению людьми, питающимися рыбой нерегулярно. Так, величина $\delta^{13}\text{C}$ в волосах людей, у которых рыба появляется в рационе 1–2 раза в неделю, 1–2 раза в месяц и менее одного раза в месяц составляет $-21,0 \pm 0,07\%$, $-20,89 \pm 0,05\%$ и $-21,00 \pm 0,08\%$, соответственно.

Для оценки влияния типа питания (растительный, мясной, рыбный) на содержание ртути и изотопный состав азота и углерода в волосах городское население разделили на три группы: 1 группа – люди, в рационе которых преобладает растительная пища; 2 группа – люди, в рационе которых преобладает мясо; 3 группа – люди, в рационе которых преобладает рыба.

Содержание ртути в волосах людей с преимущественно растительным типом питания составляет $0,065 \pm 0,025$ мг/кг и статистически значимо ниже, чем в волосах людей, в рационе которых преобладает мясо ($0,283 \pm 0,048$ мг/кг) и рыба ($0,616 \pm 0,117$ мг/кг) (рисунок 6).

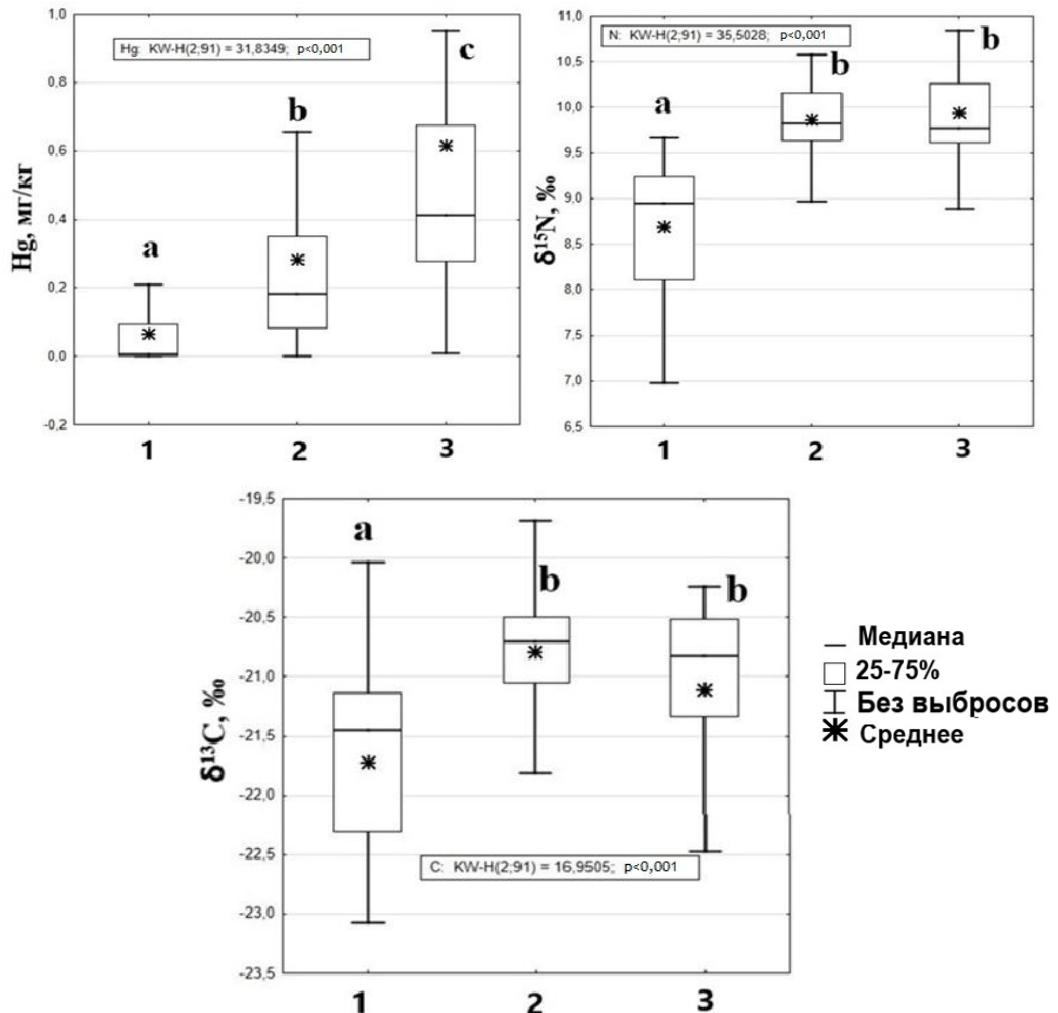


Рисунок 6 – Содержание ртути (мг/кг) и соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах жителей Вологодской области с разным типом предпочтительной пищи в рационе питания (1 – растительный тип питания, 2 – мясной тип питания; 3 – рыбный тип питания)

Изотопный состав азота и углерода в волосах людей с растительным типом питания статистически значимо содержит меньше тяжелых изотопов по сравнению с мясным и рыбным типами питания.

5.4. Соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах в зависимости от курения и связь с уровнем накопления ртути

Значения δ¹⁵N в волосах между курящими (9,94 ‰) и некурящими (9,79 ‰) людьми не различались. Значения δ¹³C в волосах статистически значимо выше у курящих (-20,64 ‰) по сравнению с некурящими (-21,0 ‰).

ГЛАВА 6. НАКОПЛЕНИЕ РТУТИ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА И СОДЕРЖАНИЕ БЕЛКА В РАЦИОНЕ ПИТАНИЯ

В главах 6.1-6.3 проанализированы закономерности накопления ртути в волосах населения, проживающего в городской и сельской местности, и проведено сравнение с другими исследованиями. Проведена оценка связи между содержанием белка в рационе питания и значениями изотопов азота и углерода в волосах человека. Даны оценки содержания ртути в мышцах рыб, отобранных как из местных водоёмов, так и из рыбы, представленных в торговой сети в сравнении с рассчитанной концентрацией ртути в мышцах рыб, исходя из значений ртути в волосах.

Полученные результаты согласуются с результатами других работ, показывающих, что рыба, употребляемая в пищу, является одним из основных источников ртути в организме человека (US EPA, 1997; Mozaffarian, Rimm, 2006; Horvat et al., 2012; Sheehan et al., 2014; Rose et al., 2015; Tong et al., 2017; EFSA, 2018). Результаты анкетирования показывают, что жители Вологодской области в среднем употребляют $606,9 \pm 409,3$ грамм рыбы в месяц. Этот показатель в четыре раза ниже данных РОССТАТА (РОССТАТ, 2017). Городское население употребляет меньшее количество рыбы (498,7 грамм/месяц), чем сельское население восточных (669,3 грамм/месяц) и западных (723,9 грамм/месяц) районов области. Для всех районов Вологодской области выявлена статистически значимая положительная корреляция между содержанием ртути в волосах и количеством употребляемой рыбы (грамм/месяц). Аналогичные корреляции выявлены у населения Малайзии (Naieb et al., 2008), Марипасулы, Французская Гвиана (Fujimura et al., 2011) и Неаполя, Италия (Diez et al., 2008). В исследовании на территории южного Китая установлено, что чем больше люди употребляют местную рыбу, тем выше риск негативного влияния ртути на здоровье (Chen et al., 2018).

Содержание ртути в волосах жителей Вологодской области зависит от того, насколько регулярно рыба встречается в рационе, что сопоставимо результатами исследований, выполненных в разных странах (Horvat et al., 2012; Sheehan et al., 2014; Rose et al., 2015; Tong et al., 2017). Однако в исследованиях на территории золотодобычи Боливар, север Колумбии не было установлено различий в зависимости от частоты потребления рыбы (Olivero-Verbel et al., 2011). Вероятнее всего, это связано с разными источниками поступления ртути в организм человека.

В странах, где регулярный рацион населения содержит мало белка, отмечается меньшее содержание тяжелого изотопа азота в волосах людей, чем у населения стран с высоким содержанием белков в повседневной пище. Это связано с тем, что в рационе людей кроме белковой пищи в большом количестве присутствуют углеводы в виде растительной клетчатки. В тоже время высокое потребление рыбного белка не всегда приводит к существенному поступлению в организм человека тяжелого изотопа азота, так как в некоторых странах белок получают из водных беспозвоночных (креветки, моллюски), которые занимают нижние трофические уровни в пищевых сетях, и, следовательно, слабо обогащены ^{15}N .

Частотное распределение величины $\delta^{15}\text{N}$ в волосах населения Вологодской области отличается от значений, отмеченных в большинстве стран Европы и в Соединенных Штатах Америки (рисунок 7).

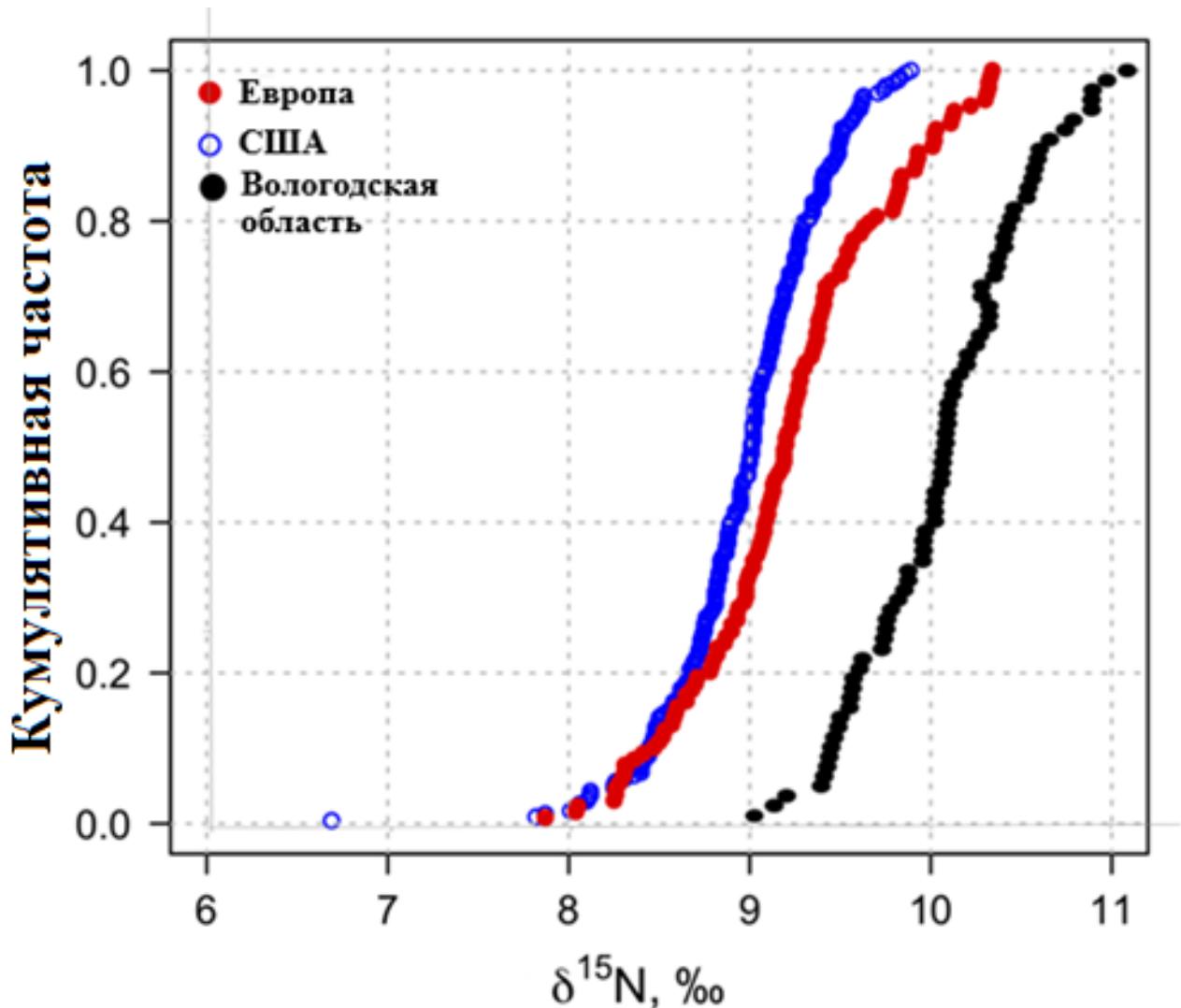


Рисунок 7 – Изотопный состав азота волос населения Вологодской области (Россия), Северной Америки (США), Финляндии, Германии, Италии, Франции, Норвегии (Европа) (Valenzuela et al., 2012)

Значения величины $\delta^{15}\text{N}$ в волосах населения Вологодской области ($9,82 \pm 0,03\text{‰}$) сопоставимы с зарегистрированными в Финляндии ($10,1\text{‰}$), Австралии ($9,7\text{‰}$) и выше на 1–1,5‰, чем у населения стран центральной Европы, США, Канады, Бразилии, стран Азии и Новой Зеландии (таблица 5).

Таблица 5 – Соотношение стабильных изотопов азота и углерода в волосах и основные источники белка в рационе питания населения разных стран.

Страна	$\delta^{15}\text{N}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	Общий белок	Рыбный белок*	Животный белок*	Рыбный и животный белок	Рыбный/Животный белок*	Рыбный / Общий белок*
				(грамм/день)			(%)	
Азия								
Китай ^a	8,5	-20,1	96,7	9,1	38,7	47,8	23,6	9,4
Япония	9,4	-19,04	86,5	16,6	47,4	64	35	19,2
Индия ^a	8,4	-20,4	57,3	1,9	11,7	13,6	16,6	3,4
Америка								
США ^c	8,9	-17,6	109,1	5,3	69,5	74,8	7,6	4,8
Канада ^a	8,4	-18,7	102,1	5,9	53,4	59,3	11	5,8
Бразилия ^d	8,99	-16,64	91,3	2,4	50,4	52,8	4,8	2,6
Мексика ^a	9,5	-17,5	85,8	4,7	40,8	45,5	11,6	5,5
Коста Рика ^a	8,8	-17,3	75,3	3,7	41,1	44,8	9	4,9
Европа								
Финляндия ^b	10,1	-22,0	114,7	8,9	70,7	79,6	12,5	7,7
Италия ^a	8,8	-20,3	112,5	8,2	60,9	69,1	13,5	7,3
Франция ^a	9,2	-20,3	109,1	8,5	68,2	76,7	12,4	7,8
Норвегия ^a	9,4	-21,0	106,4	14	63,3	73,3	22,2	13,2
Германия ^a	8,9	-20,5	102,8	4,5	62,3	66,8	7,2	4,4
Россия	–	–	101,2	6,7	54,9	61,6	12,2	6,6
Вологодская область	9,82	-20,38	82,3* *	6,95**	45,35**	52,3**	15,3**	8,4**
Великобритания ^a	9,3	-21,0	99,1	5,3	55,9	61,2	9,5	5,3
Бельгия ^a	9,4	-20,4	97,4	6,3	56,8	63,1	11,1	6,5
Швейцария ^b	8,5	-20,9	89,6	4,5	57,6	62,1	7,8	5
Океания								
Австралия ^a	9,7	-19,1	102,9	6,3	69,5	75,8	9,0	6,1
Новая Зеландия ^a	8,2	-21,2	89,5	6,4	53	59,4	12,1	7,2
Африка								
Нигерия	8,52	-19,12	58,4	2,8	8,0	10,8	34,3	4,7
Эфиопия	8,17	-14,88	55,6	0,1	7,1	7,2	2,0	0,3

Примечание: * Данные по белковому балансу, согласно FAO, 2019

** данные по белковому балансу, согласно РОССТАТ

a- Hülsemann et al., 2015

b- Valenzuela et al., 2012

c- Valenzuela et al., 2011

d- Lehn et al., 2015

Частотное распределение величины $\delta^{13}\text{C}$ в волосах населения Вологодской области значительно отличается от значений, установленных для населения Соединенных Штатов Америки, где отмечено сильное обогащение ^{13}C (рисунок 8).

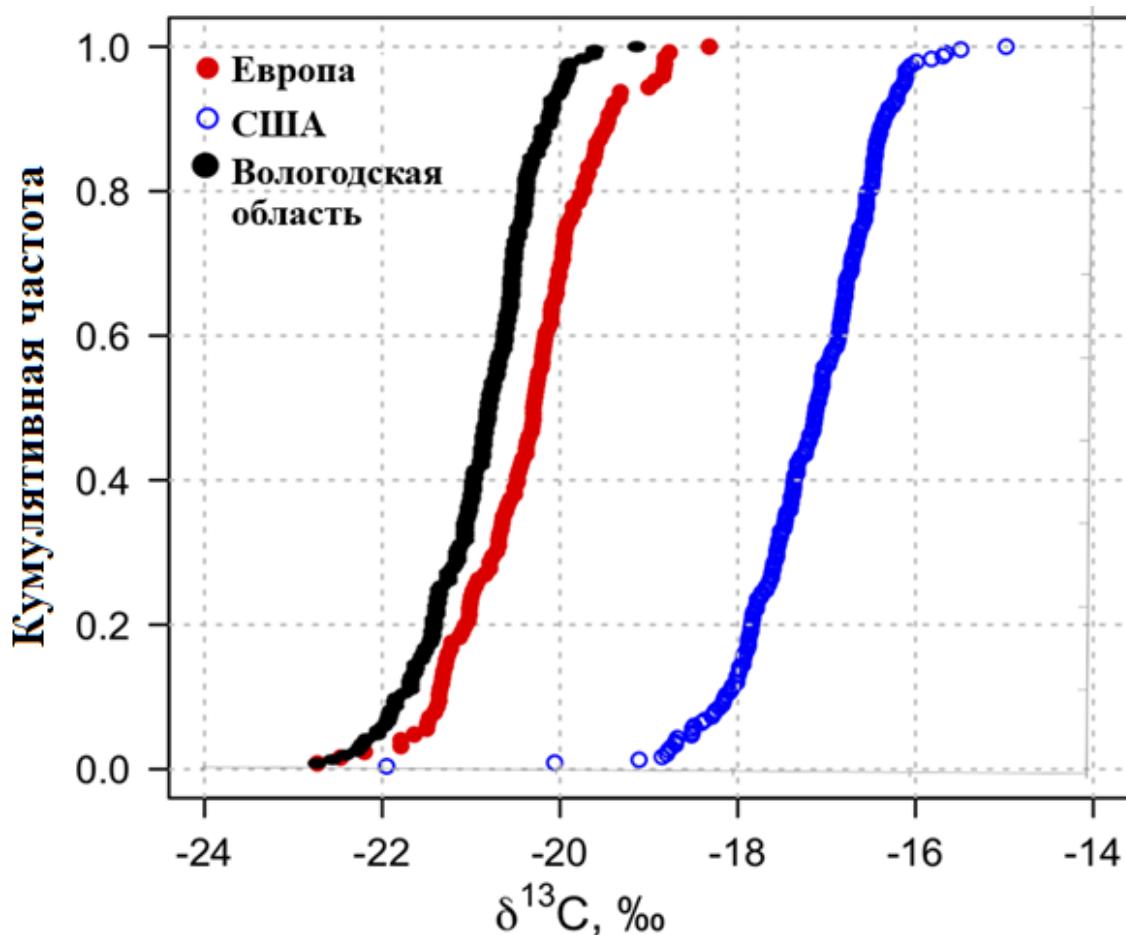


Рисунок 8 – Изотопный состав углерода волос населения Вологодской области (Россия), Северной Америки (США), Финляндии, Германии, Италии, Франции, Норвегии (Европа) (Valenzuela et al., 2012)

Считается, что изотопный состав углерода в волосах людей не зависит от типа (рыбный/наземный животный) потребляемого в пищу белка (Valenzuela et al., 2011; Valenzuela et al., 2012; Hülsemann et al., 2015; Lehn et al., 2015). Уровень обогащения ^{13}C определяется типом фотосинтеза (C3- или C4-фотосинтез) у преобладающих в рационе людей растений и их продуктов переработки. C3-растения при фотосинтезе включают в свои ткани преимущественно легкий изотоп углерода ^{12}C , а C4-растения обогащены тяжелым изотопом ^{13}C (Schoeninger et al., 1992).

Среднее значение величины $\delta^{13}\text{C}$ в волосах жителей Вологодской области составляет 20,98‰, что сопоставимо со значениями, отмеченными в волосах жителей таких европейских стран, как Норвегия ($-21,0\text{‰}$) и Великобритания ($-21,0\text{‰}$). Уровень обогащения ^{13}C у жителей западных районов области ($-21,34\text{‰}$) сопоставим с величинами, отмеченными у населения Финляндии ($-22,0\text{‰}$). При этом жители Вологодской области в среднем на 2–4‰ обеднены тяжелым изотопом углерода по сравнению с жителями ряда стран Северной и Южной Америки (США, Аргентина, Бразилия, Канада, Коста-Рика). Обогащение ^{13}C у жителей этих стран обусловлено высокой долей в повседневном рационе растений, у которых фиксация атмосферного углерода идет по пути C4-фотосинтеза (кукуруза, в том числе кукурузные хлопья, соя, сахарный тростник). Также средние значение величины $\delta^{13}\text{C}$ в волосах жителей северо-запада России на 1–1,5‰ ниже, чем у населения азиатских стран (Япония, Китай) и на 0,5‰ ниже, чем у населения Индии (таблица 5).

Используя формулу, рекомендованную Всемирной организацией здравоохранения (UNEP, WHO, 2008), была рассчитана возможная концентрация ртути в мышцах рыб, потребляемая населением. Установлено, что рассчитанные концентрации ртути в рыбе отличаются по районам. Максимальные концентрации получены в западном районе, среднее значение ртути составляет $0,420 \pm 0,039$ мг/кг, для города рассчитаны концентрации равные $0,222 \pm 0,014$ мг/кг. При этом самые низкие концентрации были рассчитаны для восточного района ($0,176 \pm 0,017$ мг/кг).

Рассчитанное содержание ртути в мышцах рыб сопоставимо с нашими и литературными данными по уровню ртути в мышцах разных видов рыб из рек, озер и торговой сети (Иванова и др., 2018; Почицкая и др., 2018; Ivanova et al., 2023). Для городского населения характерно питание мирными, хищными видами рыб, а также рыбами из торговой сети. Для восточных районов – лещ и плотва, но не исключается и питание хищными видами (окунем). Для западных районов области характерно питание хищными видами рыб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уровни накопления ртути в волосах жителей разных районов Вологодской области с большой вероятностью обусловлены особенностями регулярного рациона. Он во многом определяется особенностями экологических факторов: структурой рельефа региона. Здесь выделяют две геоморфологические области: западную, на которой сформировалось большее количество крупных озер и болот, и восточную – с более высокой холмистостью и развитой речной сетью. Геоморфологические области отличаются по доступности к промысловому и любительскому рыболовству. Как следствие, в волосах жителей западных районов отмечены максимальные значения ртути по сравнению с жителями восточных районов и промышленно-административного центра.

Выявлена связь накопления ртути от количества потребляемой рыбы и частоты ее потребления. Во всех исследованиях, не связанных с воздействием ртути в рамках профессиональной деятельности, такая же связь ртути с количеством потребляемой рыбы отмечена в работах, проведённых в Европе, Америке и Азии.

Содержание ртути в волосах мужчин и женщин не отличается у сельского населения, проживающего в восточных и западных районах области. Различия между мужчинами и женщинами выявлены только в промышленно-административном центре региона.

Зарегистрировано увеличение содержания ртути в волосах жителей области возрастом до 44 лет, после чего концентрации ртути выходят на уровень плато. Статистически значимых различий между возрастной группой 30–44 лет и старше 45 лет нет во всех отдельных изучаемых выборках. Вместе с тем различия между этими возрастными группами были отмечены для общей выборки.

Изотопный состав углерода и азота волос населения подтверждает высказанное предположение, что на территории Вологодской области рыба является основным источником ртути в организме человека. Аналогично результатам, ранее полученным за рубежом, содержание ртути в волосах Вологодской области положительно коррелирует с соотношением стабильных изотопов азота на всей территории региона.

ВЫВОДЫ

1. Содержание ртути в волосах населения Вологодской области варьирует в широких пределах (от следовых количеств до 7,640 мг/кг). Максимальные концентрации ртути отмечены в волосах сельского населения западных районов области ($0,884 \pm 0,063$ мг/кг), промежуточные – у сельского населения восточных районов ($0,367 \pm 0,023$ мг/кг), минимальные – у населения, проживающего в промышленно-административном центре Вологодской области ($0,307 \pm 0,014$ мг/кг).

2. Среднее содержание ртути в волосах мужчин составляет $0,470 \pm 0,037$ мг/кг, в волосах женщин – $0,433 \pm 0,019$ мг/кг. Статистически значимых различий по содержанию

ртути в волосах между мужчинами и женщинами не выявлено. Содержание ртути в волосах населения увеличивается с возрастом ($r_s = 0,435$; $p < 0,001$). Установлено, что содержание ртути в волосах жителей старше 44 лет ($0,875 \pm 0,053$ мг/кг) в 3 раза выше, чем в волосах детей до 18 лет ($0,270 \pm 0,027$ мг/кг). При этом содержание ртути в волосах людей старше 45 лет выходит на уровень плато. Установлено, что содержание ртути в волосах курящих людей статистически значимо выше по сравнению с некурящими для всей исследованной территории, за исключением восточных районов области.

3. Высокое содержание ртути в волосах людей является следствием частого употребления рыбы в пищу. Концентрация ртути в волосах людей, употребляющих рыбу в пищу менее одного раза в месяц, составляет $0,172 \pm 0,012$ мг/кг, 1–2 раза в месяц – $0,409 \pm 0,025$ мг/кг, раз в неделю – $0,555 \pm 0,032$ мг/кг, несколько раз в неделю – $0,995 \pm 0,105$ мг/кг. Установлена положительная корреляция между содержанием ртути в волосах и количеством употребляемой рыбы в пищу ($r_s = 0,427$; $p < 0,001$).

4. Изотопный состав азота в волосах женщин статистически значимо обогащен тяжелым изотопом по сравнению с волосами мужчин, при этом изотопный состав углерода в волосах не зависит от пола. Положительные корреляционные связи установлены между значениями $\delta^{15}\text{N}$ и возрастом для жителей всей территории области и городского населения. Выявлены отрицательные корреляционные связи между $\delta^{13}\text{C}$ и возрастом для жителей всей территории области и сельского населения запада.

5. Содержание Hg в волосах населения Вологодской области положительно коррелирует с величиной $\delta^{15}\text{N}$. Обогащение тяжелым изотопом азота в волосах людей является следствием частого употребления рыбы в пищу. У людей с преимущественно растительным типом питания содержание ртути, величины $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в волосах статистически значимо ниже по сравнению с людьми, в рационе которых преобладает мясо и рыба.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК РФ, Web of Science, Scopus

1. **Rumiantseva, O.** High variability of mercury content in the hair of Russia Northwest population: the role of the environment and social factors / **O. Rumiantseva**, E. Ivanova, V. Komov // *International Archives of Occupational and Environmental Health*. – 2022. – Vol. 95, № 5. – C. 1027–1042 (авторский вклад 85 %).

2. **Rumiantseva, O. Yu.** Influence of environmental and social factors on mercury accumulation in the hair of residents of the Northwest Russia / **O. Yu. Rumiantseva**, E. S. Ivanova, V. T. Komov // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – № 3. – C. 1335–1337 (авторский вклад 90 %).

3. **Rumiantseva, O.** Hair mercury levels in pregnant women: fish consumption as a determinant of exposure / **O. Rumiantseva**, V. Komov, M. Kutuzov, H. Zaroual, K. Mizina, M. Belova, I. Nikitin, A. Stolyarova, D. Mashin, D. Vilkova // *Toxics*. – 2024. – Vol. 12., № 5. – P. 366 (авторский вклад 50 %).

4. Ivanova, E. Mercury content and the ratio of stable nitrogen isotopes in the hair of residents from industrial city and specially protected natural area of Russia / E. Ivanova, **O. Rumiantseva**, D. Kopylov, M. Belova, M. Borisov, V. Komov // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – Vol. 31. – P. 66044–66055 (авторский вклад 75 %).

5. Ivanova, E. Assessment of the consumptive safety of mercury in fish from the surface waters of the Vologda region in northwestern Russia / E. Ivanova, L. Eltsova, V. Komov, M. Borisov, N. Tropin, S. Borboshova, **O. Rumiantseva**, V. Petrova, Yu. Udodenko // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2022. – Vol. 45. – P. 863–879 (авторский вклад 25 %).

6. Ivanova, E. S. Effects of lipid extraction on stable isotope ratios of carbon and nitrogen in muscles of freshwater fish / E. S. Ivanova, M. A. Belova, **O. Yu. Rumiantseva**, A. A. Zudilova,

D. S. Kopylov, M. Y. Borisov, V. T. Komov // *Isotopes in Environmental and Health Studies*. – 2024. – Vol. 60, № 2. – С. 162–173 (авторский вклад 35 %).

7. Иванова, Е. С. Накопление ртути в организме и её влияние на биохимические показатели крови женщин детородного возраста (на примере г. Череповца Вологодской области) / Е. С. Иванова, А. И. Корнилова, **О. Ю. Румянцева** // *Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 47–56 (авторский вклад 80 %).

8. Иванова, Е. С. Изотопный состав волос населения Вологодской области в зависимости от условий проживания и питания / Е. С. Иванова, **О. Ю. Румянцева**, А. С. Заверткина, А. Е. Буева, А. С. Елизарова // *Самарский научный вестник*. – 2021. – Т. 10, № 4. – С. 46–50 (авторский вклад 70 %).

Публикации, не входящие в перечень ВАК

9. **Rumiantseva, O.** Mercury content in the hair of residents of Babushkinsky district, Vologda region, Russia / **O. Rumiantseva**, E. Ivanova, N. Poddubnaya, U. Protasevich // *Actual Problems of Ecology and Environmental Management: Cooperation for Sustainable Development and Environmental Safety (APEEM 2021)* (22-24 April 2021). – Vologda: Web of Conferences, 2021. – P. 1–6 (авторский вклад 80 %).

10. **Rumiantseva, O. Y.** Mercury levels in the hair of indigenous population of the coastal area of the Vologda region, Russia / **O. Y. Rumiantseva**, E. S. Ivanova, A. S. Elizarova, V. T. Komov // *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018) : International Symposium on Engineering and Earth Sciences* (11–16 November 2018). – Grozny: Atlantis Press, 2018. – P. 112–116 (авторский вклад 90 %).

11. **Румянцева О.Ю.** Содержание ртути и соотношение стабильных изотопов азота и углерода в волосах населения с различным количеством рыбы из водоемов Вологодской области в рационе питания / **О.Ю. Румянцева**, Е.С. Иванова // *Сборник материалов VIII Всероссийской конференции по водной экотоксикологии, посвященной 85-летию со дня рождения Бориса Александровича Флёрова. Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН*. 2023 (17-20 октября 2023). – Борок: Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 2023. – С. 49-51 (авторский вклад 80%).

12. **Румянцева О.Ю.** Рыба Верхней Волги как источник ртути для населения / **О.Ю. Румянцева**, Е.С. Иванова, В.Т. Комов // *Проблемы экологии Волжского бассейна : труды 7-й всероссийской научной конференции, Нижний Новгород* (27–29 ноября 2022 года). Том Выпуск 5. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2022. – С. 48 (авторский вклад 50 %)

13. Заверткина, А. С. Содержание ртути в волосах студентов и медицинских работников промышленного г. Череповца / А. С. Заверткина, **О. Ю. Румянцева**, Е. С. Иванова // *EurasiaScience : сборник статей XXXVII международной научно-практической конференции* (15 мая 2021). – Москва: ООО "Актуальность.РФ", 2021. – С. 31–32 (авторский вклад 70 %).

Учебное пособие

14. Иванова, Е. С. Зоология и новые методы исследования : учебное пособие / Е. С. Иванова, Д. С. Копылов, Н. Я. Поддубная, А. А. Зудилова, М. А. Ульянова, Л. С. Ельцова, **О. Ю. Румянцева** ; Череповец. гос. ун-т. – Череповец : ЧГУ, 2023. – 208 с (авторский вклад 15 %).