

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет»

На правах рукописи

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
Доктор биологических наук, профессор
Комов Виктор Трофимович

Череповец
2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	11
1.1.Ртуть, ее характеристика, соединения ртути	11
1.1.1.Источники ртути в окружающую среду.....	12
1.1.2.Источники поступления ртути в организм человека	19
1.1.3.Механизм поступления ртути в организм человека	21
1.1.4.Влияние ртути на здоровье человека	23
1.1.5.Волосы – биомаркер воздействия ртути на организм человека	26
1.1.6.Международные и национальные рекомендации о допустимом содержании ртути в волосах.....	27
1.2.Изотопный анализ как метод оценки рациона питания	28
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ	34
ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	48
3.1.Сбор материала	48
3.2.Определение ртути	51
3.3.Определение изотопного состава углерода и азота.....	52
3.4.Расчет ежедневного поступления ртути в организм человека на массу тела	54
3.5.Статистическая обработка данных	56

ГЛАВА 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РТУТИ В ВОЛОСАХ ЖИТЕЛЕЙ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ.....	57
4.1. Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения разных районов области	57
4.2. Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения различных демографических групп.....	62
4.3. Связь содержания ртути в волосах населения с частотой употребления рыбы в пищу	66
4.4. Содержание ртути (мг/кг) в волосах курящих и некурящих людей	70
ГЛАВА 5. Содержание ртути (мг/кг) и соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах жителей Вологодской области.....	71
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	72
5.2. Соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах населения различных демографических групп и связь с уровнем накопления ртути.	81
5.3. Влияние рациона питания жителей Вологодской области на изотопный состав азота, углерода (‰) и содержание ртути (мг/кг) в волосах	87
5.4. Соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах в зависимости от курения и связь с уровнем накопления ртути	95
ГЛАВА 6. Накопление ртути в организме человека и содержание белка в рационе питания	100
6.1. Связь накопления ртути в волосах населения, проживающего в городской и сельской местности	100
6.2. Содержание белка в рационе питания и значение изотопов азота и углерода	104
6.3. Содержание ртути (мг/кг) в мышцах рыб из местных водоемов и рыбных продуктов торговой сети	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	122

ВЫВОДЫ.....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126

ВВЕДЕНИЕ

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, 2013).

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) (Sundseth et al., 2017; UNEP, 2008, 2013). 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 кислотных озер (pH воды $< 5,0$) разных регионов мира, включая Северо-Запад России (Haines et al., 1995; Nemova et al., 2000; Spry, Wiener, 1991).

Основными источниками биодоступной ртути в организм человека является употребление в пищу рыбы, морепродуктов и, в меньшей степени, риса (Du et al., 2020; EFSA, 2018; Rice et al., 1997; WHO, 1990). Метилртуть составляет 80–90% от общей ртути, содержащейся в мышечной ткани рыб (Dusek et al., 2005; Finley et al., 2016; Lavoie et al., 2013; Li, Cai, 2013; US EPA, 2010). 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 разном трофическом уровне – с увеличением трофического 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 (Металлогения 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 исследуется особенности содержания и распределения ртути в биотических и абиотических компонентах водных и наземных экосистем (Комов и др., 2004; Haines et al., 1995; Ivanova et al., 2020, Khabarova et al., 2018). 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 (Шувалова и др., 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 выположенный 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 основным источником ртути в организм людей, проживающих на территории Вологодской области. Уровень поступления 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 апробация 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, собирал 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 обработке данных, обсуждении и интерпретации полученных результатов, а также подготовке 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.

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 помощь на всех этапах диссертационной работы. Также автор выражает благодарность студентам и сотрудникам кафедры биологии Череповецкого государственного университета за поддержку, участие в исследовании и помощь в организации сбора материала для диссертационной работы. Автор признателен кандидату биологических наук, доценту Ивановой Елене Сергеевне за мотивацию и помощь, 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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Ртуть, ее характеристика, соединения ртути

Ртуть (Hg) (от лат. Hydrargerum — жидкое серебро) — элемент II группы 6-го периода периодической системы Д. И. Менделеева. Порядковый номер 80, атомная масса 200,59 (URL: <http://chem100.ru/text.php?t=1731>). Ртуть в обычных условиях представляет собой блестящий, серебристо-белый тяжелый жидкий металл. Удельный вес при 20 °C 13,54616 г/см³; температура плавления равна –38,89 °C, кипения – 357,25 °C. При замерзании (–38,89 °C) становится твердой и легко поддается ковке (Трахтенберг, Коршун, 1988).

Среднее содержание ртути в литосфере составляет 0,07 мг/кг, в мировой кларк для почв – 0,1 мг/кг. В природе ртуть встречается в виде сульфида ртути (киноварь), изредка находится в виде самородных вкраплений в горных породах.

В окружающей среде ртуть образует разнообразные соединения, которые часто подвергаются взаимному превращению. Все это делает сложным определение отдельных соединений ртути. Поэтому описывая особенности биогеохимического поведения ртути ограничиваются указанием только ее отдельных форм. Сюда включают группы или классы соединений с общими свойствами.

Наиболее широко используется представление о трех формах ртути: 1) элементарная ртуть (Hg⁰), которая в зависимости от условий может быть металлической или газообразной; 2) двухвалентная ртуть (Hg²⁺); 3) органическая форма, представленная преимущественно метилртутью (MeHg).

Из-за своих уникальных свойств ртуть и ее соединения широко применяются в электротехнике, медицине, химии, сельском хозяйстве. Как сама ртуть, так и ее соединения отличаются высокой токсичностью. Наиболее значительное разрушающее воздействие на организм оказывают ртутьорганические соединения, в первую очередь метилртуть.

Ртуть и ее соединения (Hg) отличаются высокой токсичностью для большинства живых организмов (Andersen et al., 2005; Blake, 2004; Rodier, 1995). Даже низкие дозы ртутьорганических соединений могут вызывать нарушения

функций головного мозга. Возможно возникновение нейропсихологических симптомов, проявляющихся в нарушении речи, снижении внимания и памяти, нарушения моторных функций (Grandjean et al., 2006). Кроме того, органическая ртуть отличается высокой биодоступностью по сравнению с другими формами. Элементарная ртуть, в том числе и жидкая ртуть из термометров, менее токсична по сравнению с ртутьорганическими соединениями и становится опасна при переходе в газовую Hg^0 (WHO, 1976).

1.1.1. Источники ртути в окружающую среду.

Ртуть в элементарной форме поступает в окружающую среду как из природных источников (извержение вулканов, геотермальные процессы, лесные пожары, выветривание ртутьсодержащих горных пород и природная дегазация земной коры), так и в результате деятельности человека. Поступление ртути в атмосферу во время извержения вулканов обусловлено тектоническими движениями и магматической активностью (Selin, 2009).

К основным антропогенным источникам ртути относятся: добыча и использование угля, нефти, природного газа, добыча самородной ртути, черная и цветная металлургия, производство цемента (Renzoni et al., 1998).

Металлическая ртуть до сих пор широко используется при кустарной и мелкомасштабной добыче золота для отделения золота от руды путем формирования амальгам. При нагревании амальгамы, Hg^0 испаряется и высвобождается в атмосферу (Jain et al., 2016). Нелегальная золотодобыча является основным антропогенным источником газообразной ртути в атмосферу (UNEP, 2019). Золотодобыча с применением амальгамирования является одним важным источником выбросов ртути в окружающую среду, затрагивающих миллионы людей, особенно в странах с низким и средним уровнем дохода (Veiga et al., 2006).

Элементарную ртуть применяют как вспомогательный материал при производстве хлора, водорода, и гидроксида натрия путем электролиза солевого раствора. Газообразный хлор образуется на аноде ртутного электролита, а амальгама натрия – на катоде. Затем, амальгама разделяется на гидроксид натрия и

ртуть, реагируя с водой. Впоследствии ртуть рециркулируется в окружающую среду. На сегодняшний день, промышленное применение ртути ограничено, потому что при хлор-щелочном процессе значительное количество ртути поступает в атмосферу, природные воды. Кроме того, образуются ртутьсодержащие отходы, аккумулирующиеся на свалках (Kinsey et al., 2004). Сжигание ископаемого топлива (уголь, нефть, природный газ) также является значительным источником выбросов ртути в атмосферу (UNEP, 2013). По современным расчетам, объем антропогенной эмиссии ртути в атмосферу достигает 2500 т/год, или 55% от общего поступления ртути в атмосферу за год (UNEP, 2019) (рисунок 1).

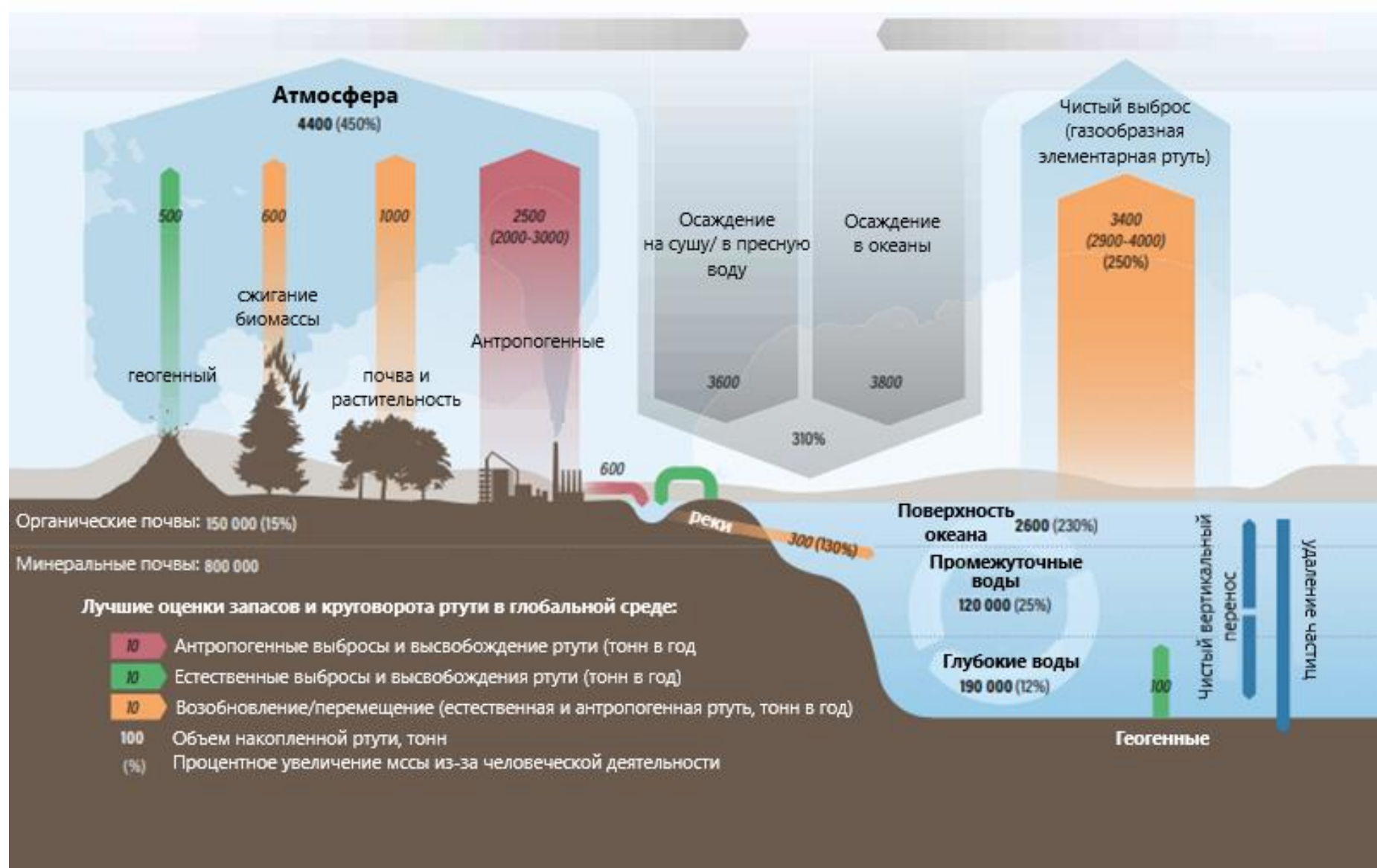


Рисунок 1 – Модель глобального баланса ртути, которая показывает влияние антропогенной деятельности на цикл ртути и увеличение ее запасов в литосфере и гидросфере (UNEP, 2019).

Согласно данным UNEP (2019) в мире, основным источником выбросов ртути является кустарная и мелкомасштабная добыча золота (около 38%), за которой следует стационарное сжигание угля (около 21%). За ними следуют выбросы от производства цветных металлов (около 15%) и производство цемента (около 11%). Выбросы, связанные с утилизацией отходов продуктов с добавлением ртути (7%), стационарным сжиганием других видов топлива, включая биомассу (3%), производством черных металлов (2%), остальная часть приходится на другие источники (2%) (UNEP, 2019).

Большой объем выбросов ртути характерен для стран Азии (49%, из которых 39% в Восточной и Юго-Восточной Азии), для Южной Америки – 18%, для стран Африки к югу от Сахары – 16%. Кустарная и мелкомасштабная добыча золота составляет около 70% и до 80% выбросов для Южной Америки и странам Африки к югу от Сахары, соответственно. Если не учитывать выбросы, связанные с кустарной и мелкомасштабной добычей золота, то наибольшая доля выбросов по-прежнему приходится на регион Восточной и Юго-Восточной Азии (47% от оставшегося общего объема), а на Южную Азию приходится еще больше выбросов. Для России, стран СНГ и других Европейских стран, не входящих в Европейский союз, доля выбросов составляет 16% выбросов, здесь основным источником ртути является цветная металлургия (UNEP, 2019). Сжигание угля составляет основную часть выбросов Hg для Северной Америки (почти 60%), Европейского Союза (более 50%) и Австралии, Новой Зеландии и Океании (37%) (UNEP, 2019)

Ртуть в атмосфере.

В атмосфере более 90% ртути от ее валового содержания представлено элементарной газообразной ртутью (Hg^0). Она может находиться в атмосфере от 0,8 месяцев до 1,7 года и переносится с воздушными потоками на существенные расстояния от своего источника (Ariya et al., 2015). Этому способствуют специфические свойства металла: высокая летучесть и высокое давление пара, которые увеличивают время нахождения ртути в атмосфере, а также низкая растворимость в воде (Morel et al., 1998). В атмосфере элементарная ртуть может взаимодействовать с различными мелкими частицами, окисляться и сорбироваться

на их поверхности в форме Hg^{2+} . Химические превращения элементарной формы ртути, происходящие в атмосфере, играют важную роль в ее биогеохимическом цикле (Lin, Pehkonen, 1999). Высвобождение ртути из атмосферы происходит с осадками (дождь и снег), а также в результате гравитационного оседания и поверхностной сорбции.

Перенос элементарной ртути на большие расстояния является основной мировой проблемой, так как она может осаждаться на земную и водную поверхность в местах, расположенных на значительном удалении от возможных источников ртути. При определенных условиях, поступившая из атмосферы ртуть трансформируется в метилртуть, что создает риск для человека и окружающей среды (UNEP, 2013).

Ртуть в водной среде.

Ртуть попадает в водные системы из атмосферы преимущественно в двухвалентной форме в результате влажного или сухого осаждения (Winfrey, Rudd, 1990). В водных экосистемах, часть поступившей ртути реагирует с компонентами входящими в состав растворенного органического вещества. Другая часть поступает в донные отложения водных объектов, где образует труднорастворимые сульфиды ртути (рисунок 2).

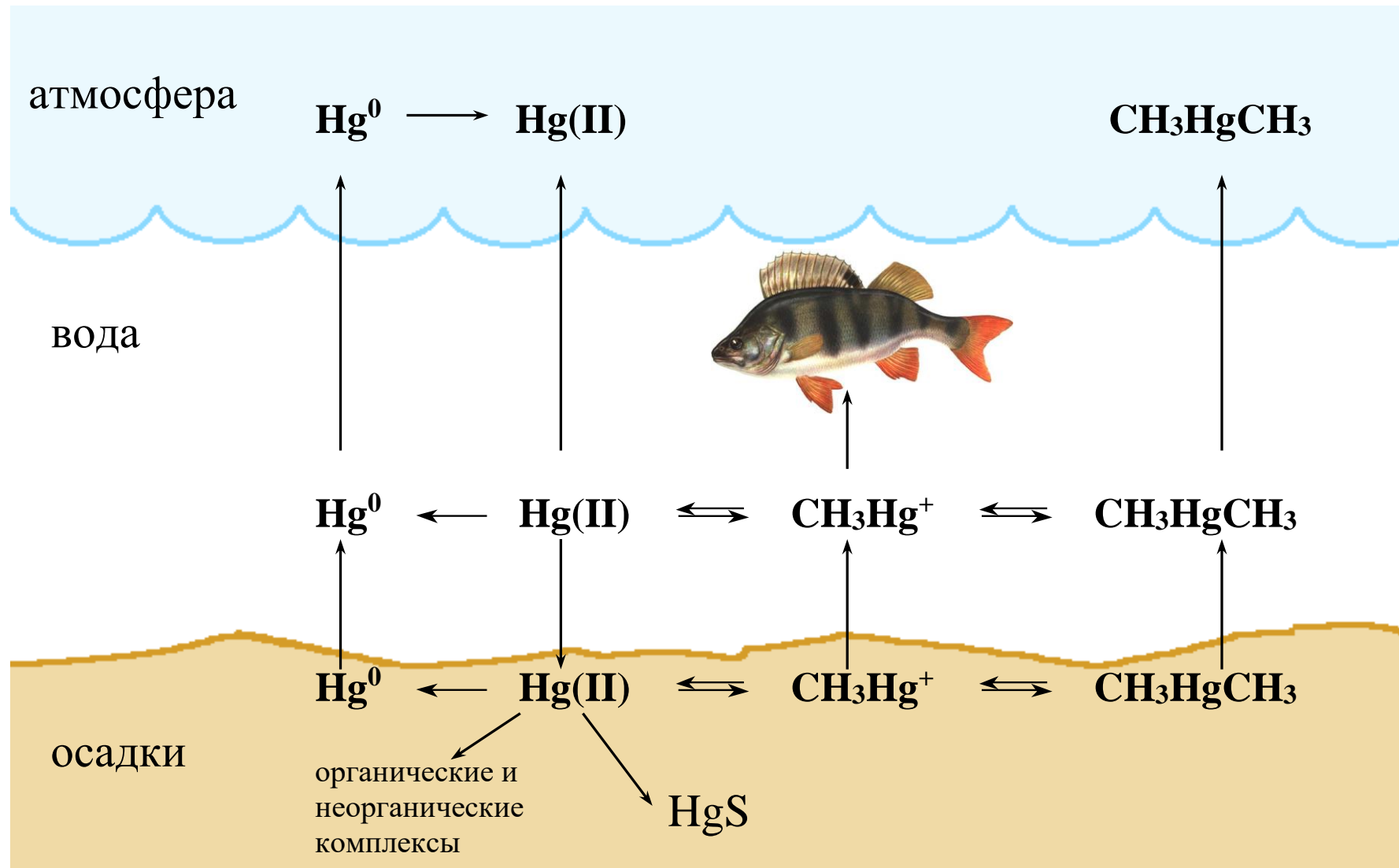


Рисунок 2 – Биогеохимический цикл ртути в пресных водоемах (Winfrey, Rudd, 1990)

Кроме того, ртуть может быть подвергнута метилированию абиотическим и биотическим путем. Процессы метилирования ртути способствуют образованию метилртути. Абиотическим способом метилирование ртути способствует йодистый метил (CH_3I) и диметилсульфид. CH_3I производят в морской среде такие организмы, как цианобактерии, морские водоросли, водоросли и грибы, в то время как диметилсульфид производится морским фитопланктоном (Celo et al., 2006; Keller et al., 1989).

Биотическое метилирование происходит за счет анаэробных бактерий. Например, *Desulfovibrio desulfuricans* способен превращать Hg^0 в метилртуть путем окисления Hg^0 до Hg^{2+} с последующим метилированием. Хотя механизм окисления Hg^0 анаэробными бактериями, такими как *D. desulfuricans*, до сих пор неизвестны. Предположительно, окисление происходит за счет переноса электрона от Hg^0 к акцептору электронов в тиоловых группах, в основном в клеточной стенке или цитоплазме у анаэробных бактерий. Как только Hg^0 был окислен до Hg^{2+} , происходит метилирование (Colombo et al., 2013; Hu et al., 2013).

После образования метилртути может дополнительно перейти в диметилртуть, которая является летучей и легко выделяется в атмосферу (рисунок 2). Однако эта реакция протекает в основном при высоком pH (>7), и не ожидается, что образование диметилртути будет значительным при низком pH. Чистое количество метилртути, образующейся в пресных водоемах, является результатом сопутствующих процессов метилирования и деметилирования. В кислых озерах процессы метилирования ртути протекают более интенсивно (Winfrey, Rudd, 1990.). Закисление водоемов в основном связано с атмосферным выпадением кислотообразующих соединений серы и азота (Комов, 2007). Условия высокой гумифицированности влияют на интенсивное высвобождение инертной ртути из донных отложений и ее перехода в растворенное состояние (Немова и др., 2014; Amirbahman et al., 2002; Steinberg, 2003).

Деметилирование метилртути, приводящее к образованию элементарной ртути (с неорганическим ионом ртути в качестве промежуточного продукта) и

метана. Деметилирование происходит в основном в воде и донных отложениях (Winfrey, Rudd, 1990.).

Ртуть в почвах.

Элементарная ртуть поступает в наземные системы из атмосферы (Schroeder, Munthe, 1998). Выпадение ртути с осадками из атмосферы происходит главным образом в двухвалентной форме, но было высказано предположение, что и в элементарной форме ртуть также присутствует (Rundgren et al., 1992). Также элементарная ртуть в виде частиц осаждается в почве путем гравитационного осаждения, а также сорбироваться почвой и растительностью (Zhang et al., 2009). На территории Вологодской области, известно содержание ртути в почве близ индустриального района: содержание ртути в почвах суходольного луга (элювиальный ландшафт) – 25 нг/г, в почвах низинного луга (аккумулятивный ландшафт) – 188 нг/г, при этом не превышало ПДК валовой ртути для почв (Удоденко и др., 2022).

1.1.2. Источники поступления ртути в организм человека

Элементарная ртуть поступает в организм человека преимущественно при реставрации зубных амальгам. Кроме того, работники, занятые на кустарной и мелкомасштабной добыче золота также подвержены повышенному воздействию паров элементарной ртути. Примерно 80% вдыхаемой газообразной Hg^0 поступает в кровь, легко проходит через гематоэнцефалический барьер, достигает головного мозга и нарушает работу центральной нервной системы (WHO, 1976). Со временем газообразная Hg^0 окисляется в организме до двухвалентной ртути (Hg^{2+}), которая накапливается в почках (UNIDO, 2008).

Период полувыведения ртути из организма человека составляет приблизительно 2–4 дня. За это время 90% адсорбированной в кровь газообразной ртути выделяется мочой и фекалиями. Поглощение Hg^{2+} через пищеварительный тракт сравнительно невелико. Однако большое потребление Hg^{2+} , например, при случайном или суицидальном проглатывании, вызывает расстройства пищеварительного тракта и почек, приводящие к смерти (WHO, 1990).

Основным источником MeHg в организм человека является потребление рыбы и моллюсков (Hightower et al., 2003; Horvat et al., 2012; Mozaffarian, Rimm, 2006; Myers et al., 2007; Rice et al., 1997; Rose et al., 2015; Sheehan et al., 2014). Согласно Всемирной организации здравоохранения, рыба является главным источником белка для населения прибрежных районов (WHO, 2009). Считается, что MeHg легко усваивается пищеварительным трактом. Исследования на животных показывают, что в желудочно-кишечном тракте усваивается более 90% метилртути поступившей в организм с пищей (WHO, 1990). Эксперты по оценке риска часто предполагали, что до 100% Hg в рыбе представлено в форме MeHg, и скорость ее поглощения также составляет 100% (NRC, 2000).

Метилртуть способна передаваться и накапливаться по пищевой сети от консументов нижних трофических уровней к консументам, занимающим верхние трофические уровни. Поэтому в водных экосистемах наибольшие концентрации отмечаются в организме хищных видов рыб (Немова и др., 2014). Максимальные концентрации ртути отмечены в органах и тканях рыб из озер с уровнем pH ниже 5,0 (Nemova et al., 2000; Spry, Wiener, 1991) и с повышенным уровнем гумификации (Steinberg, 2003).

На территории Вологодской области, Северо-Запада России сформировались благоприятные условия для продуцирования органической формы ртути и ее дальнейшего вовлечения в локальные пищевые сети (Немова и др., 2014). Население Северо-Западного округа Российской Федерации стоит на четвертом месте по количеству, употребляемой рыбы в год 21,6 кг (Горбунов и др., 2016). Рыба, обитающая в многочисленных озерах Северо-Запада России, традиционно присутствует и разнообразно представлена в рационе местного населения. В водоемах Вологодской области нередко регистрировались высокие концентрации ртути в мышцах рыб (Комов и др., 2004, Ivanova et al., 2023). Например, в водоемах западной части региона неоднократно отмечалось превышение ПДК ртути в мышцах рыб (окунь массой более 300 грамм – 0,40 мг/кг и 0,66 мг/кг) (Комов и др., 2004).

Учитывая потенциальные неблагоприятные последствия воздействия метилртути на организм человека, Агентство по охране окружающей среды США (USEPA) и Управление по контролю за продуктами и лекарствами (FDA) совместно предоставили рекомендации по потреблению рыбы (US EPA, 2001).

1.1.3. Механизм поступления ртути в организм человека

Люди подвергаются воздействию ртути через воздух, пищу, питье и зубы, обработанные амальгамой. Известно, что из ртути, попадающей в организм человека, метилртуть имеет самую сильную токсичность для человека (WHO, 1990). Известно, что концентрация общей ртути в воздухе составляет $<10 \text{ нг/м}^3$, 22% из которых составляют монометилртуть и диметилртуть. Однако среднее количество метилртути, которое люди получают из воздуха, составляет $<0,04 \text{ мкг/день}$, поэтому воздух не является основным источником воздействия метилртути.

Неорганическая ртуть, выбрасываемая из различных загрязняющих веществ, попадает в моря, реки и ручьи, преобразуется в метилртуть бактериями и планктоном в воде, накапливается в пелагических организмах, включая рыбу и моллюсков, и попадает в организм человека через потребление рыбы и моллюсков (WHO, 1990). Когда метилртуть попадает в организм человека, она производит дисульфиды с высоким химическим сродством к сульфгидрильным группам белков. Дисульфиды делают структуры белков и функции ферментов неспецифичными и вызывают отравление (Hughes, 1957; Kim et al., 2006). Из-за этого люди, живущие в загрязненных ртутью районах, страдают от острого или хронического отравления ртутью без профессионального воздействия.

Скорость абсорбции неорганической ртути составляет не более 2–38 %, в то время как органическая ртуть (метилртуть) абсорбируется почти полностью и поступает в кровь (Abernethy et al., 2010). Когда люди употребляют пищу, загрязненную метилртутью, она отделяется желудочной кислотой, затем соединяется с цистеином среди аминокислот в двенадцатиперстной кишке, и почти 100 % ртути абсорбируется. Далее ртуть соединяется с гемоглобином эритроцитов

через воротную вену, накапливается в центральной нервной системе и вызывает нарушения нейронов (Lee et al., 2006). Она легко проникает через гематоэнцефалический барьер и плаценту и накапливается в мозге плода больше, чем у матерей (UNEP, WHO, 2008). Концентрация метилртути в организмах относительно стабильна пропорционально концентрации в крови, и 90% метилртути распределяется в эритроцитах. Соответственно, если мы измеряем концентрацию метилртути в крови, мы можем сделать вывод о концентрации в органах. Поскольку метилртуть не оказывает жироподобного действия, она очень легко проникает через клеточную мембрану. При воздействии метилртути на человека, ртуть из крови перемещается в фолликул на стадии роста волос и накапливается. Концентрация ртути в волосах пропорциональна концентрации в крови (WHO, 2007).

В эксперименте на животных до 95 % метилртути абсорбировалось легкими. Поскольку она легко растворяется в жире и быстро абсорбируется в пищеварительном тракте, метилртуть показала всасывание в 17–35 раз быстрее, чем неорганическая ртуть. Максимальная концентрация метилртути в крови была обнаружена через 6 часов после воздействия пищи, и 95 % принятого количества было абсорбировано (WHO, 2007).

Известно, что метилртуть преобразуется в двухвалентную неорганическую ртуть и подвергается окислению и восстановлению (Abernethy et al., 2010). Доказано, что метилртуть обладает высокой жирорастворимостью, токсична для центральной нервной системы, которая имеет высокое содержание жира (Food, 2007).

Основными путями выведения метилртути являются желчь и кал. Метилртуть выводится с желчью, но часть ее реабсорбируется через энтерогепатическую циркуляцию и поступает в печень (Abernethy et al., 2010; WHO, 1990). Большая часть метилртути растворяется путем деметилирования и выводится с калом в ионной форме (Abernethy et al., 2010). Поскольку выведение метилртути с мочой очень незначительно, концентрация метилртути в моче не определяется точно из-за наличия неорганической ртути. Следовательно,

концентрация ртути в моче не может быть хорошим показателем для измерения накопления метилртути в организме или ее концентрации в основных органах (Food, 2007). Период полураспада метилртути, то есть время, за которое содержание метилртути в организме уменьшается наполовину посредством выведения, составляет в среднем 70 дней. Кроме того, органическая ртуть может выводиться через грудное молоко, а период полураспада метилртути у кормящих грудью женщин намного короче, чем у других женщин (WHO, 1990).

1.1.4. Влияние ртути на здоровье человека

Отрицательное влияние ртути на организм человека достаточно широко изучено. Массовые отравления людей соединениями ртути в Японии и в Ираке в середине XX в. способствовали развитию исследований воздействия соединений ртути на организм людей.

В 1950-х годах в залив Минамата, Японии, сбрасывали химические отходы, образовавшиеся в результате производства ацетальдегида. Эти отходы способствовали накоплению метилртути в биоте, обитающей в заливе. В результате это привело к разрушительным последствиям для здоровья тысяч местных жителей, которые потребляли рыбу в качестве основного источника пищи (Kurland et al., 1960). Было установлено, что MeHg вызывает неблагоприятные неврологические воздействия у взрослых и детей. Данная болезнь теперь известна как болезнь Минамата (Harada, 1998). Пациенты с хроническим отравлением Hg жалуются на парезы конечностей и мимических мышц даже через 30 лет после прекращения воздействия MeHg (Ekino et al., 2007). Позже было показано, что у жителей побережья залива Минамата, подвергшихся воздействию метилртути, но у которых не диагностирована болезнь Минамата, проявляются различные симптомы нарушения психики (снижение интеллекта, быстрые перепады настроения, поведенческая дисфункция и др.) (Yorifuji et al., 2011). С повышением осведомленности об охране окружающей среды болезни вызванные острым отравлением Hg от промышленного загрязнения, такого как в заливе Минамата, стали редки. Однако выросли масштабы хронического воздействия более низких

доз ртути в результате глобального загрязнения или профессионального риска. Например, Продовольственная и сельскохозяйственная организация (ФАО) / Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) указали, что миллиарды людей, у которых рыба является основным источником белка, подвергаются риску повышенного воздействия MeHg (FAO, WHO, 2024).

В 1970-х годах на территории Ирака так же были зафиксированы массовые отравления людей ртутью. Источником ртути послужило зерно, приобретенное в 1971 г. Ираком у Соединенных Штатов Америки (США). Зерно не предназначалось для употребления в пищу, поскольку была протравлено метилртутью. Однако, из него изготовили муку, из которой позже пекли хлеб. Отравление организма ртутью развивалось длительно. Что бы накопить опасную для организма человека дозу нужно было съесть более 20 кг отравленного хлеба. Основными симптомами отравления были: онемение и покалывание конечностей, за которыми следовали нарушение координации и слепота. Затем человек терял сознание, развивался паралич, заканчивающийся летальным исходом. В результате отравления умерло 459 человек, 6,5 тысяч людей были госпитализированы (Adimado et al., 2002)

Ртуть оказывает неблагоприятное воздействие на такие органы человека, как печень и почки (Li et al., 2010). Организм человека не имеет механизмов для активного выведения ртути (WHO, 1990). Ртуть обладает высоким сродством с сульфгидрильными группами в составе белков (Salonen et al., 1995, 2000; WHO, 1990). Органические соединения ртути могут проходить через плацентарный барьер (Huang et al., 2017; Sakamoto et al., 2007) и нарушать развитие нервной системы у плода. Установлено, что концентрация MeHg в крови плода примерно в 2 раза выше, чем у матери, из-за активного переноса MeHg через плаценту (NRC, 2000; WHO, 1990).

В ряде исследований, подтверждена репродуктивная токсичность метилртути. Выявлена корреляция между хромосомной аномалией и сестринским хроматидным обменом в зависимости от воздействия метилртути (NRC, 2000). Эксперименты на животных, подвергшихся кратковременному воздействию высоких концентрации метилртути, выявили такие последствия как снижение

количества сперматозоидов, атрофию яичек, уменьшение размера детенышей при одних родах, снижение выживаемости плодов и деформацию плода (Hong et al., 2012). При внутрибрюшинной инъекции 0,4–0,8 мг/кг дициандиамида метилртути мышей на седьмой, девятый и двенадцатый день беременности растущие плоды показали наибольшую чувствительность к токсичности метилртути (Spyker D., Spyker J., 1977). Смертность из-за внутриутробного воздействия в 2 раза выше, чем от воздействия после рождения, и влияние было наибольшим в конце органогенеза. Для животных-матерей воздействие токсиканта не было заметным, однако внутриутробное воздействие для потомства более опасно, чем постнатальное – через грудное молоко (Spyker D., Spyker J., 1977). Несмотря на эти данные, на сегодняшний день исследований репродуктивной токсичности низких концентраций метилртути отсутствуют.

Согласно отчету Национального исследовательского совета (NRC) (NRC, 2000), у людей с высоким уровнем воздействия метилртути отмечены повышенная частота антинуклеарных аутоантител, изменения уровня цитокинов в сыворотке и повышенный риск заражения малярией (Crompton et al., 2002; Gardner et al., 2010).

Из-за уникальных физиологических свойств ртути происходит увеличение окислительного стресса, которое приводит к сердечно-сосудистым заболеваниям (Houston, 2011; Salonen et al., 1995; WHO, 1990; Yoshizawa et al., 2002).

Метилртуть способствует образованию свободных радикалов и нарушает антиоксидантные эффекты глутатиона и каталазы, поскольку она имеет высокое сродство к тиоловой группе, вызывает перекисное окисление липидов, способствует агрегации тромбоцитов и свертыванию крови, вызывает склероз артерий и повышает артериальное давление (Salonen et al., 1995; Virtanen et al., 2005). Как следствие, возрастает риск инфаркта миокарда, а также смертности от ишемической болезни сердца и других сердечно-сосудистых заболеваний (Virtanen et al., 2005). В Финляндии, при повышении уровня ртути выше 2мг/кг в волосах были отмечены нарушения сердечно-сосудистой системы у мужчин (Salonen et al., 1995).

Согласно выводам NRC, воздействие ртути влияет на развитие сердечно-сосудистых заболеваний. К кардиотоксическим эффектам MeHg относят повышенное кровяное давление, аномалии сердечного ритма, патологические изменения на электрокардиограмме (ЭКГ) и миокардит (NRC, 2000).

1.1.5. Волосы – биомаркер воздействия ртути на организм человека

В последнее время анализ концентраций ртути в волосах широко используется для оценки уровня поступления металла в организм человека (UNEP, WHO, 2008). Содержание ртути в волосах положительно коррелирует с ее содержанием в крови (Horvat et al., 2012). Как правило, в волосах содержится в 250–300 раз больше ртути, чем в крови. Это связано с тем, что серосодержащие белки (такие как кератин) могут связаться с большим количеством MeHg, чем белки с небольшим количеством серосодержащих функциональных групп (например, гемоглобин).

Содержание ртути в волосах считается достоверным показателем количества ртути, поступающей внутрь организма (Harkins, Susten, 2003). Около 90% ртути, содержащейся в волосах, находится в метилированной форме (Berglund et al., 2005; Brodzka, Trzcinka-Ochocka, 2009). Этот показатель является хорошим биомаркером длительного воздействия метилртути, но не является маркером воздействия неорганических форм металла (UNEP, WHO, 2008).

Волосы – предпочтительный биоматериал для оценки воздействия метилртути на организм человека так как сведены к минимуму проблемы сбора, хранения и транспортировки исследуемого материала. Исследования ртути в волосах людей проводился неоднократно в других странах. Согласно методике ВОЗ, В 2015 году Европейское региональное бюро ВОЗ опубликовало отчет «Биомониторинг человека: факты и цифры», в котором была проведена оценка распределения ртути в организме человека по различным странам на основе данных с 2000 года (Human biomonitoring, 2015)

Установлено, что более высокие концентрации ртути в волосах отмечено у населения, проживающего в районах мелкомасштабной добычи золота: Индонезия

(9,405 мг/кг), Кения (5,26 мг/кг), Мьянма (2,264 мг/кг) (Bell et al., 2017). Также повышенные значения отмечены в волосах населения прибрежных районов с высоким потреблением рыбы и морепродукты: Побережье Персидского залива, Иран (Бандар-Аббас – 1,56 мг/кг, Бушер – 1,97 мг/кг, Махшахр – 5,12 мг/кг) (Okati, Esmaili-sari, 2018), Колумбийская Амазония – 17,29 мг/кг (Olivero-Verbel et al., 2016), Япония – 1.82 мг/кг (Yasutake et al., 2004), Малайзия – 11,45 мг/кг (Hajeb et al., 2008), Камито, Колумбия – 4.91 мг/кг (Olivero et al., 2002). В Европейских странах концентрации ртути ниже (Великобритания — 0,190 мг/кг (Lindow et al., 2003), Чехия — 0,240 мг/кг (Kruzikova et al., 2009), Швеция — 0,350 мг/кг (Björnberg et al., 2003), Испания (0,8 мг/кг) (Batista et al., 1996). Значения не превышающие 1мг/кг зарегистрированы в США (0,83 мг/кг) (Gerstenberger et al., 1997), в Китае — 0,83 мг/кг (Liu et al., 2008), в Индии – 0,80 мг/кг (Gibb et al., 2016).

1.1.6. Международные и национальные рекомендации о допустимом содержании ртути в волосах

В настоящее время, рекомендации относительно поступления метилртути с пищей и о нормативах ее содержания в биосредах (крови, моче, волосах) в разных странах мирах различаются.

Так, Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) для РФ приняты следующие фоновые уровни ртути в волосах – 0,5–1 мкг/г. Биологически допустимыми считаются содержания ртути – 5,0 мкг/г (Ориентировочные..., 1992).

Агентством США по охране окружающей среды (US EPA) установлены рекомендуемые уровни ртути в волосах (<1 мг/кг), которые соответствуют референтной дозе поступления (RFD) 0,1 мкг/кг массы тела в сутки (NRC, 2000). Для женщин репродуктивного возраста установлено рекомендуемое референтное значение 0,58 мг/кг (Bellanger et al., 2013). Согласно научной литературе при повышении концентрации ртути в волосах женщин детородного возраста 0,58 мг/кг, выявляются слабовыраженные отклонения в интеллектуальном развитии детей и другие нарушения (Bellanger et al., 2013; Trasande et al., 2005). В Финском исследовании установлена норма ртути в волосах у мужчин до 2 мг/кг. При

повышении данной нормы были отмечены нарушения сердечно-сосудистой системы у мужчин (Salonen et al., 1995).

1.2. Изотопный анализ как метод оценки рациона питания

Изотопный анализ волос и шерсти является удобным не инвазивным методом для изучения трофического статуса и особенностей спектра питания человека и животных (Careddu et al., 2021; L'Hérault et al., 2018). С 1980-х годов соотношения углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и азота ($\delta^{15}\text{N}$) в волосах человека используют для интерпретации и идентификации пищевых привычек и статуса питания современных (Fuller et al., 2004; Hülsemann et al., 2015; Lehn et al., 2015; Nakamura et al., 1982; Petzke et al., 2006; Valenzuela et al., 2011, 2012;) и древних людей (Roy et al., 2005; Wilson et al., 2007).

Значения изотопа углерода ($\delta^{13}\text{C}$) варьируются в зависимости от трех путей фотосинтеза C_3 , C_4 и САМ (фотосинтез по типу толстянковых) у растений. C_3 -растения характеризуются более отрицательными значениями $\delta^{13}\text{C}$. Растения с C_4 фотосинтезом более обогащены тяжелым изотопом углерода (^{13}C). Для C_4 -растений в процессе фотосинтеза происходит более эффективное обогащение ^{13}C при фиксации углекислого газа, при этом C_3 -растения включают в свои ткани преимущественно легкий изотоп углерода (^{12}C) (White et al., 2012). САМ-растения могут использовать любой из фотосинтетических путей в зависимости от количества дневного фотосинтеза, но, как правило, они редко встречаются в рационе человека по сравнению с растениями C_3 и C_4 (Reitsema, 2015; Schoeninger, Moore, 1992).

Изотопный состав углерода волос человека, а также других тканей, зависит от доли C_3 и C_4 растений в рационе питания. Люди со смешанным растительным питанием, показывают промежуточные значения $\delta^{13}\text{C}$ между диетами, основанными на растениях с C_3 и с C_4 типами фотосинтеза (Nash et al., 2012).

Значения $\delta^{13}\text{C}$ в волосах человека показывают долю белка в рационе питания, основанного на растениях C_3 или C_4 (Bender, 1971; Kusaka et al., 2016; Macko et al., 1999). Поскольку существует ограниченное фракционирование изотопов углерода

между растениями и животным белком в качестве источников пищи в рационе человека, значения $\delta^{13}\text{C}$ животного белка отражают те же модели потребления, основанного на растениях C_3/C_4 (Petzke, Fuller, 2011). Основными представителями C_3 -растений являются зерновые культуры, бобовые, овощи, кустарники, древесные и другие растения, которые характерны для прохладного влажного климата. Кукуруза, сорго, просо, сахарный тростник и другие растения тропической и субтропической зоны относят к растениям с C_4 типом фотосинтеза (Farquhar et al., 1989).

В работе Martinelli et al., (2011) отмечено, что изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в говяжьих котлетах различаются в зависимости от региона: в странах с рационом на основе C_4 растений (Бразилия, Мексика и США) значения $\delta^{13}\text{C}$ выше, чем в Европе, где крупный рогатый скот питается в основном C_3 -растениями.

Величина $\delta^{13}\text{C}$ в волосах варьируется из-за разного соотношения продуктов животного и растительного происхождения в рационе, что облегчает возможную аналитическую дифференциацию между веганами, вегетарианцами и всеядными (Macko et al., 1999; Petzke et al., 2005).

Соотношение стабильных изотопов азота в волосах людей в первую очередь определяются изотопным составом источников белка и относительным потреблением этих белков (Petzke, Fuller, 2011).

Азот в растения может поступать как из атмосферы путем биологической фиксации, так и через почву, в том числе с удобрениями. При этом растения, которые получают органические удобрения, производимые животными, имеют более высокие значения $\delta^{15}\text{N}$ по сравнению с минеральными удобрениями (Szpak, 2014). После включения в ткани растений азот движется вверх по пищевой сети с преимущественной потерей легких изотопов азота (^{14}N) по сравнению с тяжёлыми изотопами (^{15}N). Следовательно, организмы, расположенные на более высоких трофических уровнях в пищевой цепи, более обогащены ^{15}N , чем организмы, расположенные в нижней части цепи (Iken et al., 2005). Таким образом, люди, которые преимущественно питаются растительной пищей имеют тенденцию к истощению ^{15}N по сравнению с всеядными людьми (Dierkes et al., 2023).

Эксперименты на животных показали, что высокие значения $\delta^{15}\text{N}$ связаны с высокобелковыми диетами (Sponheimer et al., 2003). При избытке белка в диете происходит дезаминирование. Фракционирующий процесс, дезаминирование вызывает обогащение ^{15}N в организме. Высокое содержание белка в диете или любое другое физиологическое состояние, приводящее к повышенной биодоступности белка, может спровоцировать эту метаболическую реакцию. Поскольку диеты, включающие животный или рыбный белок, также приведут к обогащению ^{15}N в тканях потребителей, этот физиологический эффект высокого содержания белка на значения $\delta^{15}\text{N}$ может быть неясен (Huelsemann et al., 2009).

Значения $\delta^{15}\text{N}$ волос обычно используются для оценки соотношения продуктов растительного происхождения по сравнению с продуктами животного происхождения в рационе человека, где более высокие значения $\delta^{15}\text{N}$ представляют большее потребление белков животного происхождения (Ehleringer et al., 2020).

Люди, употребляющие в основном рыбу и морепродукты, будут иметь более высокие значения $\delta^{15}\text{N}$, чем люди, которые питаются наземными животными (Huelsemann et al., 2013).

Ткани морских и пресноводных рыб имеют максимальные значения показателя изотопный состав азота, по сравнению с другими видами продуктов животного происхождения (Schoeninger, DeNiro, 1984). Это объясняется тем, что пищевая цепь в водных экосистемах более сложная, включающая несколько трофических степеней, что увеличивает обогащение пищи тяжелым изотопом азота ^{15}N (Huelsemann et al., 2013). У рыб, выращенных на ферме, $\delta^{15}\text{N}$ значительно меньше, чем у дикой рыбы. Такие различия связаны с тем, что корма для выращенных в искусственных условиях рыб содержат большое количество растительного белка (Bloomfield et al., 2011). Величина $\delta^{15}\text{N}$ дает представление не только о диетических привычках человека, а также об их состоянии питания (например, стресс, здоровье или беременность) (Petzke et al., 2006). Повышенные значения $\delta^{15}\text{N}$ зафиксированы при недоедании и голодании (Gabriele, 2018).

Выбор продуктов питания влияет на изотопный состав тела, при этом каждый продукт питания оставляет свой особый изотопный отпечаток. Более высокий $\delta^{15}\text{N}$

все чаще рассматривается как биомаркер потребления мяса и рыбы, так как содержание стабильных изотопов азота выше у животных, чем у растений, составляющих наш современный рацион.

Значение изотопов азота и углерода могут значительно различаться в зависимости от страны и культурной группы (например, страны Юго-Восточной Азии, употребляющие преимущественно рис, по сравнению со многими странами Латинской Америки, где диета в большей степени основана на кукурузе). В таблице 1 представлены значения $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ в основных продуктах питания Японии, Германии, Аляски (Minagawa, 1992; Nash et al., 2012; Petzke et al., 2005).

Таблица 1 – Соотношение стабильных изотопов азота (‰) и углерода (‰) в продуктах питания

Продукты	$\delta^{15}\text{N}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	Страна
рис	4,7	-26,8	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
пшеница	4,1	-22,6	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
просо	$1,7 \pm 2,8$	$-10,8 \pm 0,04$	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
гречиха	4,5	-11,2	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
кукуруза	-1,1	-10,4	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
бобовые	$2,0 \pm 0,5$	$-25,5 \pm 0,8$	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
горох	1,5	-24,7	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
овощи	$3,5 \pm 1,1$	$-25,8 \pm 1,6$	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
лук		-27	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
сладкий перец	4,6	-29	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
салат		-24,4	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
картофель	0,2	-25,4	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
батат	0,2	-25,4	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
фрукты	$2,3 \pm 1,6$	$-26,9 \pm 0,4$	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
банан	3,9	-27,3	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
яблоки	0,7	-26,5	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
мясо	$6,4 \pm 1$	$-16,3 \pm 1,7$	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
говядина	7,7	-15,8	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
говядина	7	-19,5	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
свинина	6,6	-15,9	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
курица	6	-16,1	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
курица	4,9	-14,3	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
яйцо	$6,1 \pm 1,2$	$-14,2 \pm 0,6$	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
желток	7,7	-13,5	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
белок	5,7	-14,9	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
Целое яйцо	4,9	-14,3	Япония, Токио (Minagawa, 1992)

Продолжение таблицы 1

Продукты	$\delta^{15}\text{N}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	Страна
молочные продукты	6,6	-21,1	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
рыба	12,4 \pm 3,8	-17,6 \pm 1,1	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
тунец	19	-16,8	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
фугу	12,1	-16,1	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
камп	9,4	-18,9	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
лосось	11,4	-17,8	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
моллюски	8,1 \pm 1,1	-18,0 \pm 3,1	Япония, Токио (Minagawa, 1992)
говядина	6,6 \pm 0,2	-20 \pm 0,2	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
свинина	3,9 \pm 0,1	-24,3 \pm 0,2	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
индейка	2,3 \pm 0,3	-24,0 \pm 0,3	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
кисломолочный сыр	6,4 \pm 0,2	-21,1 \pm 0,1	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
сыр камамбер	5,4 \pm 0,3	-21,3 \pm 0,2	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
куриное яйцо	4,8 \pm 0,1	-22,0 \pm 0,1	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
рожд	-2,7 \pm 1,7	-25,0 \pm 0,4	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
пшеница	1,4 \pm 0,8	-26,0 \pm 0,2	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
овсяные хлопья	0,1 \pm 1,7	-27,3 \pm 0,2	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
белая фасоль	1,2 \pm 1,3	-25,9 \pm 0,2	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
кукурузные хлопья	1,9 \pm 2,8	-10,7 \pm 0,0	Германия, супермаркет (Petzke et al., 2005)
водоплавающая птица	7,3 \pm 2.1	-23,8 \pm 3.6	Аляска, (Nash et al., 2012)
наземные животные	3,7 \pm 4.1	-24,5 \pm 4.2	Аляска, (Nash et al., 2012)
наземные растения	-0,3 \pm 2.2	-27,4 \pm 1.8	Аляска, (Nash et al., 2012)
еда из супермаркета			
кукуруза и тростниковый сахар	4,0 \pm 0.6	-12,4 \pm 1.3	Аляска, (Nash et al., 2012)
мясо	3,7 \pm 1.4	-17,2 \pm 1.2	Аляска, (Nash et al., 2012)
молочное	4,5 \pm 0.5	-21,4 \pm 1.3	Аляска, (Nash et al., 2012)
зерна и овощи	2,1 \pm 1.9	-26,6 \pm 2.0	Аляска, (Nash et al., 2012)

Согласно представленным данным растения с C_3 типом фотосинтеза имеют диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ от -27‰ до -22‰, напротив растения с C_4 типом фотосинтеза более обогащены ^{13}C и диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ составляет – (-15‰ до -10 ‰).

В Японии мясо животных (говядина (-15,8‰, -19,5‰), свинина (-15,9‰), курица (-14,3‰, -16,1‰) более обогащены тяжелым изотопом углерода по

сравнению с мясом животных из Германии (говядина (-20‰), свинина (-24,3‰), индейка (-24,0‰)). Мясо из супермаркета Аляски имеет промежуточное значение $\delta^{13}\text{C}$ и составляет -17,2 ‰. Рацион скота и птицы из Японии в значительной степени состоял из C_4 растений, в первую очередь кукурузы, рацион европейского скота основана на C_3 растениях, при этом значение $\delta^{13}\text{C}$ в мясе из супермаркетов Аляски указывает на смешанный рацион животных.

Низкие значения величины $\delta^{15}\text{N}$ отмечены для растений (-2,7‰ до 7‰). Промежуточные значения $\delta^{15}\text{N}$ отмечены для мяса травоядных животных (от 3 до 8 ‰). При этом величины $\delta^{15}\text{N}$ для рыбы выше и составляет от 8,1 ‰ (морепродукты) до 19‰ (тунец). Данные значения изотопов азота также подтверждают, что животные водных экосистем более обогащены тяжелым изотопом азота.

Исследования по оценке связи изотопов азота, углерода со ртутью в организме человека проведено значимо мало. Endo et al., (2015) проанализировали концентрацию Hg и значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах жителей семи стран – Вьетнам, Новая Зеландия, Испания, США, Южная Корея, Бразилия и Япония. Самая высокая концентрация Hg, а также более высокое значение $\delta^{15}\text{N}$ были отмечены в волосах людей с преимущественно рыбой в рационе питания, тогда как самые низкие значения Hg, $\delta^{15}\text{N}$ обнаружены в волосах вегетарианцев и тех, кто не ест рыбу. Содержание ртути в волосах людей положительно коррелировали со значениями $\delta^{15}\text{N}$ в каждой стране и заметно увеличивались в образцах с $\delta^{15}\text{N}$, превышающие 9,0 ‰, вероятно, из-за потребления рыбы. Самая высокая концентрация ртути была отмечена со значением $\delta^{13}\text{C}$ от -19 до -18‰, что, вероятно, отражает значение $\delta^{13}\text{C}$ морской пищевой сети (Endo et al., 2015).

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Данное исследование проводилось на территории Вологодской области (58°27' и 61°36' с.ш.; 34°42' и 47°10' в.д.), которая расположена на северо-западе Европейской части России. Протяженность данного региона с севера на юг – 250–380 км, с запада на восток – 650 км, площадь территории составляет 145,7 тыс. км². Область граничит: на севере – с Архангельской областью и Республикой Карелия, на юге – с Костромской и Ярославской областями, на западе – с Новгородской и Ленинградской областями, на юго-западе – с Тверской областью, на востоке – с Кировской областью (Природа..., 2007).

Рельеф. Вологодская область расположена на северо-востоке Восточно-Европейской равнины, в континентальной части таёжной зоны. Протяженность области с запада на восток составляет 600 км, с севера на юг 380 км. Значительные размеры региона определяют разнообразие природных экологических факторов. Неоднородность рельефа территории вызывает перераспределения 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 °С), количество осадков уменьшается (разница в годовых суммах достигает 160-170 мм) (Природа..., 2007).

Граница между западной и восточной геоморфологическими областями проводится по западному флангу полосы низин, прилегающих к озерам Лача, Воже, Кубенское и далее через бассейн р. 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 озер 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 озера и болота не получили здесь широкого распространения (Кичигин, 2007). Различия между западной и восточной геоморфологическими областями так же проявляется в разнице абсолютных и относительных высот, изменении коэффициента озерности (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).

Климат. Вологодская область характеризуется умеренно-континентальным климатом лесной зоны. Средняя годовая температура понижается с запада на восток от +2,5 до +1,5 °С. Средняя температура января от –10,9 °С на западе до –13,8 °С на востоке, средняя температура июля соответственно от +16 до +18 °С. Количество атмосферных осадков в разных районах Вологодской области колеблется в пределах от 500 до 670 мм, испарение составляет 300–350 мм, что свидетельствует об избыточном увлажнении. Относительная влажность воздуха в среднем годовом – до 72 % (Природа..., 2007).

Водные ресурсы. Водный фонд Вологодской области включает в себя более 500 тысяч гектар. Из них более 4 тысяч малых озер и четыре крупных озера, которые располагаются в западных районах Вологодской области: Белое озеро (Белозерский район) площадью 1130 км², озеро Воже (Вожегодский район) — 416 км², Кубенское озеро (Усть-Кубинский район) — 407 км². Два водохранилища, которые располагаются в Череповецком и Шекснинском районах – Шекснинское и северная часть Рыбинского. На территории Вологодской области имеются 1232 реки, общей протяженностью около 33 тысяч километров (Болотова и др., 2000).

Озерность территории области распределена неравномерна. Величина озерности для Вологодской области составляет 1,98%. При этом для западных районов она превышает 4%. Если рассматривать отдельно по районам, то в Кирилловском районе процент озерности составляет от 5 – 10%. Вашкинский, Белозерский, Бабаевский районы имеют процент озерности от 10 – 15%. Самый высокий процент озерности для Вологодской области отмечен в западном районе: Вытегорский район имеет значение более 15%. В восточных районах процент озерности отмечен менее 2,5%. Вожегодский, Харовский, Сямженский и Усть-Кубинский районы имеют процент озерности от 2,5 – 5 %. На территории Череповецкого, Вологодского, Шекснинского районов – менее 2,5 % озерности (Антипов, 1981; Атлас, 2007) (рисунок 3).

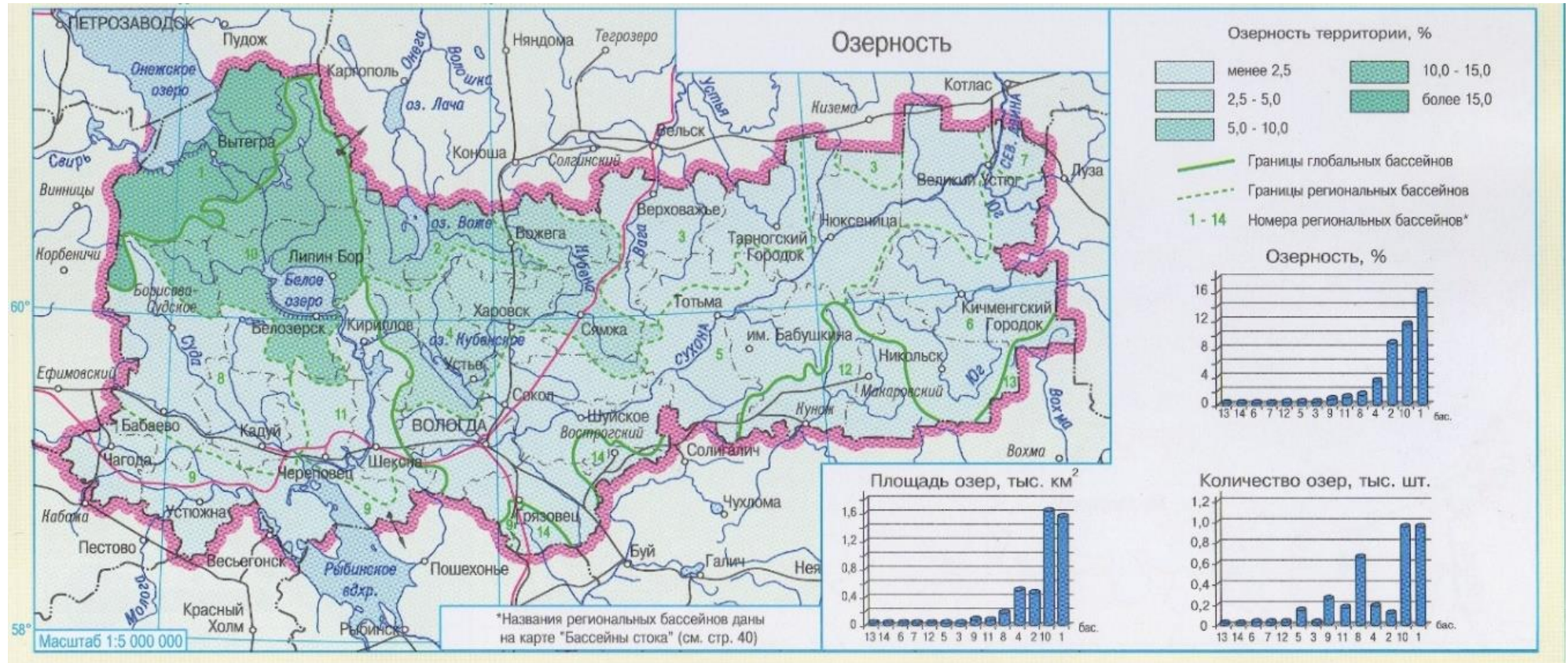


Рисунок 3 – Озерность территории Вологодской области (Атлас, 2007)

Реки Вологодской области принадлежат бассейнам Балтийского моря (реки Вытегра, Андома, Мегра, Ошта с притоками), Белого моря (реки Сухона, Кубена, Елома, Порозовица с притоками) и Каспийского моря (реки Шексна, Молога, Суда, верхнее течение р. Унжи, притоки Костромы и Ветлуги (Природа..., 2007).

Гидрографическая сеть в основном обусловлена геоморфологическими и гидрогеологическими особенностями. Наибольшим развитием отличается речная сеть возвышенных районов с пересеченным рельефом, в особенности на юго-востоке области (Природа..., 2007). По данным Р.А. Филенко (1966), густота речной сети на юго-востоке области достигает $0,77 \text{ км/ км}^2$, в центральной части – $0,59 \text{ км/ км}^2$, на юго-западе – $0,24\text{--}0,29 \text{ км/ км}^2$ (Филенко, 1966). В Череповецком районе густота речной сети – менее $0,5 \text{ км/ км}^2$, в Вологодском районе – $0,5\text{--}1 \text{ км/ км}$. В западных районах в основном густота речной сети менее $0,5 \text{ км/ км}^2$. Но встречается от $0,5\text{--}1 \text{ км/ км}^2$. При этом, в восточных районах Вологодской области отмечен самый большой показатель густоты речной сети: более 1 км/ км^2 в Кич-Городецком, Никольском, Великоустюгском, Бабушкинском районах (Атлас, 2007) (рисунок 4).

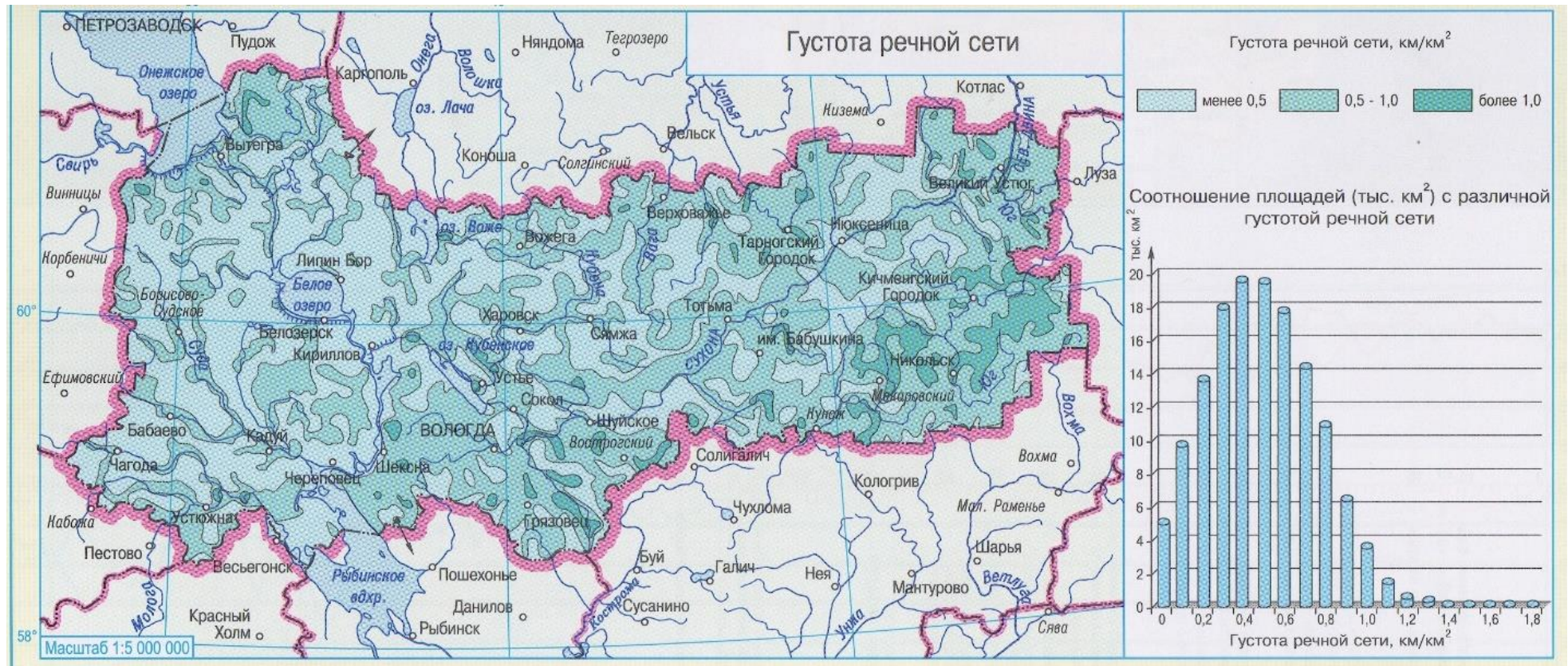


Рисунок 4 – Густота речной сети на территории Вологодской области (Атлас, 2007)

На территории Вологодской области неравномерно распределены болота (Абрамова, 1965). Наиболее заболочены территории западных и особенно юго-западных районов области, заболоченность составляет 20–50 %. Восточная часть области наименее заболочена, ее заторфованность не превышает 1 % (Природа..., 1957). Большая часть болот располагается в западных районах области: Бабаевский, Белозерский, Вытегорский, Кирилловский, Вожегодский. На территории восточной части Вологодской области в районах Кич-Городецком, Великоустюгском также отмечено большое количество болот. При этом, на территории восточных районов области (Великоустюгский, Кич-Городецкий, Никольский, Бабушкинский, Тарногский, Верховажский, Сямженский, Харовский) отмечен самый низкий процент заболоченности территории (менее 5 %). А также на территории Вологодского, Шекснинского и Грязовецкого районов отмечен самый низкий процент заболоченности территории. На территории Нюксенского, Тотемского, Сокольского, Усть-Кубинского, Вашкинского районов процент заболоченности территории равняется от 5 до 10 %. В Междуреченском районе установлен процент заболоченности от 10 до 15%. В западных районах отмечен самый высокий процент заболоченности территории. От 10 до 15% заболоченности территории отмечен в Кирилловском, Белозерском, Вытегорском, Череповецком районах. В Чагодощенском районе 15– 20% заболочено территории. Самый высокий показатель заболоченности отмечен в Бабаевском, Кадуйском, Устюженском районах и составляет от 15–20% (Атлас, 2007) (рисунок 5).

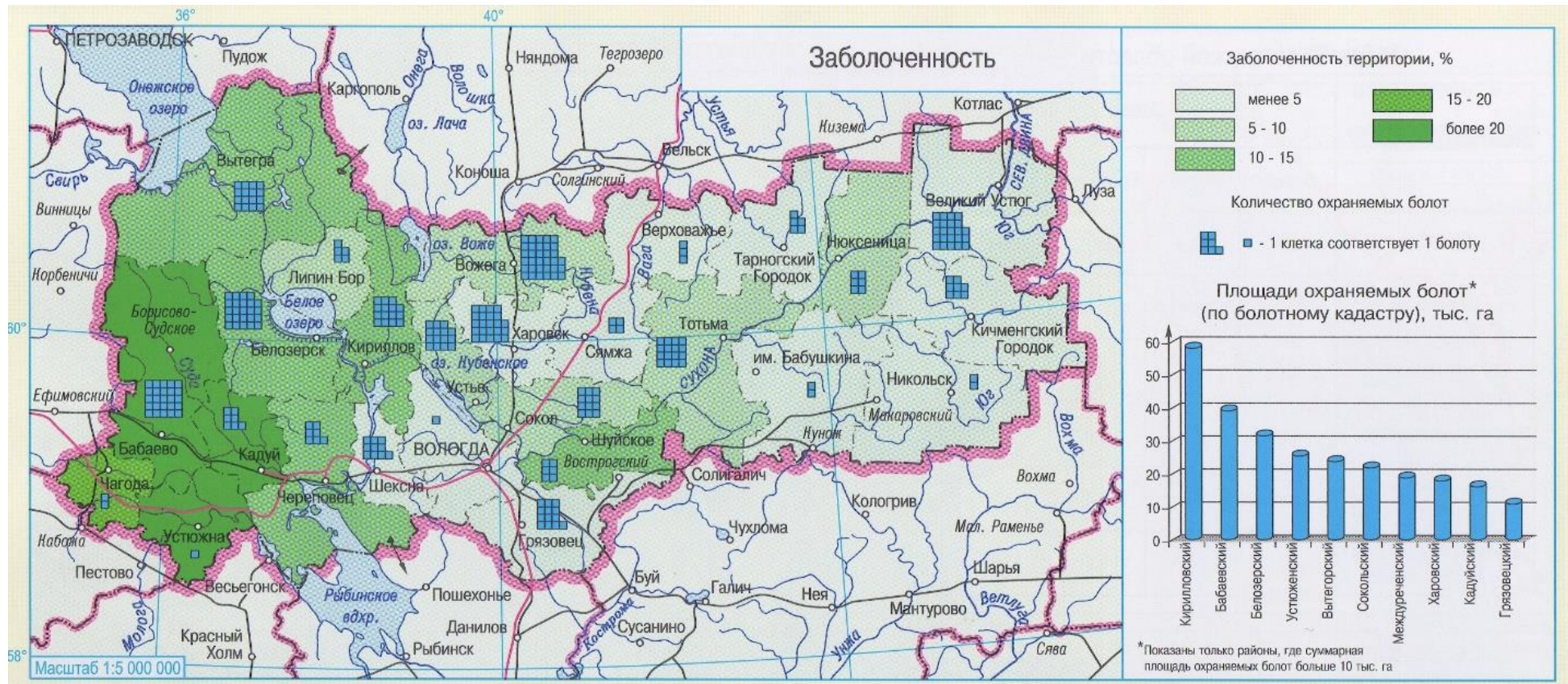


Рисунок 5 – Заболоченность Вологодской области (Атлас, 2007)

Экономическая характеристика Вологодской области. Вологодская область – один из лидирующих регионов России по черной металлургии, а также по производству минеральных удобрений. Развита электроэнергетика, существует в области крупнейшая ГРЭС – Череповецкая мощностью 1050 МВт. Широко развито сельское хозяйство, основной отраслью является молочное животноводство.

В Вологодской области отмечается невысокий уровень безработицы – 1,4%. В регионе производится очень большое количество разнообразных товаров, от сливочного масла и колбасы, до фанеры, электрооборудования и минеральных удобрений.

Трудовые ресурсы Вологодской области составляют 750 тыс. человек, экономически активное население – 650 тыс. человек. Большая их часть занята в материальном производстве, главным образом в отраслях обрабатывающей промышленности, сельском хозяйстве, строительстве и на транспорте. Основной отраслью специализации является черная металлургия — 62,7 %, на втором месте — электроэнергетика — 7,9 %. На её долю приходится 17 % производимого в стране проката, 16 % — стали, 11 % — минеральных удобрений, 14,5 % — подшипников качения, 7 % — деловой древесины, 11,4 % — льняных тканей, 1,5 % от общего объёма российского экспорта — продукция вологодских предприятий (URL:

http://www.rcp.ru/geografiya_ekonomicheskaya_geografiya/ekonomika_vologodskoj_oblasti.html/)

Крупнейшие предприятия региона: ПАО «Северсталь», ООО «Газпром Вологда», АО «Апатит», «Вологодский оптико-механический завод» (URL: http://www.rcp.ru/geografiya_ekonomicheskaya_geografiya/ekonomika_vologodskoj_oblasti.html/).

Экономика промышленно-административного центра (Вологодского, Череповецкого, Шекснинского районов).

Череповецкий район. Промышленное производство Череповецкого района сосредоточено в отрасли обрабатывающие производства (58,7%), а также отрасль производства и распределения электроэнергии, газа, пара и воды (41,2%). Также Череповецкий район – это один из крупнейших сельскохозяйственных районов области. На данный момент действуют 17 сельхозпредприятий, например, «Ботово», «Мяксинский», «Овощное», «Октябрьское», «Парфеново» «Уломское», а также 13 фермерских хозяйств.

В городе Череповец развита металлургическая и химическая промышленности. Основные предприятия города: ПАО «Северсталь», ОАО «Северсталь-метиз», АО «Апатит». В Череповце также развита деревообрабатывающая промышленность, металлообработка, пищевая и лёгкая промышленности, строительного комплекса (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Вологодский район. Сельскохозяйственное производство (71%) является основной отраслью данного района. Сюда относится мясомолочное животноводство, льноводство, а также овощеводство. Основные сельхозпредприятия Вологодского района: «Агрофирма Красная Звезда», «Ильюшинский», «Племзавод «Майский», «Племптица-Можайское», «Племзавод Родина», «Присухонское».

В Вологодском районе представлено промышленное производство (19%) и сфера услуг (10%). Здесь развиты деревообрабатывающая, лесная, пищевая промышленности, а также теплоэнергетика (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Шекснинский район. На территории Шекснинского муниципального района широко развиты отрасли лесопромышленного комплекса, металлургического производства, пищевой промышленности и сельского хозяйства (молочное животноводство, растениеводство и льноводстве. Основные предприятия на данной территории ООО «Шекснинский комбинат древесных

плит», ООО «Северсталь-ТПЗ Шексна», филиал ООО «ГазпромТрансгаз Ухта» - Шекснинское ЛПУ МГ, ООО «Шекснинский бройлер» (Экономика Вологодской области) (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Экономика западных районов Вологодской области.

Бабаевский район. В отрасли производство и распределения электроэнергии, газа и воды занята около 30% населения. Остальные отрасли Бабаевского района – это лесоперерабатывающее производство, а также производство пищевых продуктов и напитков (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Белозерский район. Основная отрасль данного района – лесопромышленное производство. ОАО «Белозерский леспромхоз» является крупнейшим лесозаготовительным предприятием (лесохозяйственная деятельность составляет 73% всего промышленного производства района). Также здесь развито рыболовство, поскольку в водоемах Белозерского района обитают различные виды рыб: судак, лещ, щука, налим, карась, язь, ерш, чехонь, жерех, ряпушка, снеток, синец. Для переработки рыбы был рыбоконсервный комбинат ОАО «Белозерский рыбоконсервный комбинат» (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Вашкинский район. На данной территории широко развита лесная промышленность, а также сельское хозяйство. В сельхозпредприятиях Вашкинского района производят мясо, молоко, выращивают зерновые и кормовые культуры, заготавливают сотни тонн сена и кормов. Переработкой молока занимается Липиноборский маслозавод. В ассортименте предприятия: масло животное, цельномолочная продукция. Также здесь развито рыболовство: вылавливаются судаки, щуки, лещи, окуни и снеток (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Вожегодский район. В Вожегодском районе развита сельскохозяйственная промышленность. Предприятия молочного и мясного животноводства: ООО «СПК им. Ленина», ООО «Дружба», ООО «Искра», ООО «АПК Чушевицы». КФХ «Нектар» (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Вытегорский район. В данном районе широко развита лесная промышленность: лесозаготовительное и деревоперерабатывающее производство. Основные предприятия данной отрасли - ЗАО «Белый Ручей», ЗАО «Онегалеспром» и ООО «Лесопильный и деревообрабатывающий комбинат № 2» (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/). Также развиты энергетика; добыча полезных ископаемых, пищевая промышленность (Комплексный ..., 2017).

Кадуйский район. На данной территории развита электроэнергетика: Череповецкая ГРЭС (филиал ПАО ОГК-2). Развита деревоперерабатывающая промышленность: производство клееной фанеры ООО «Кадуйский фанерный комбинат», мебельное производство ООО «Фабрика Дерусса», производство пиломатериалов ООО «Сивец». В Кадуйском районе развита пищевая промышленность: ЗАО «Арсенал вин» (производство алкогольной продукции) и ООО рыботороварной фирмой «Диана» (производство осетровой икры, выращивание различных пород рыб). Также в сельском поселении Никольское открыто малое предприятие по производству хлебобулочной продукции (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Кирилловский район. В Кирилловском районе широко развито агропромышленное производство и сфера туризма, производство пищевых продуктов, а также лесная промышленность (обработка древесины) (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Сокольский район. В Сокольском районе развиты целлюлозно-бумажная промышленность (ПАО «Сокольский ЦБК»), деревообрабатывающая промышленность (АО «Сокольский деревообрабатывающий комбинат»), пищевая промышленность (ООО «Сухонский молочный комбинат», СПК «Сокольский мясокомбинат»), а также производство строительных материалов (ООО «ГрандСтрой», ООО «С-Древ», ООО «Соколстром») (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Устюженский район. Основная отрасль данного района представлена обрабатывающим производством. Также развита пищевая отрасль: молочная и кисломолочная продукция -ООО «Устюженский АПК; ПО «Хлебозавод», ООО

«Русберри Лайн» (дикорастущих ягод и грибов, а также глубокая заморозка). Развита лесная и деревоперерабатывающая промышленность: лесозаготовительная деятельность и переработка древесины (МУП «Устюженский леспромхоз», ООО «ЛПК им. Желябова»). В Устюженском районе развито сельское хозяйство и представлено следующими предприятиями: СПК Пригородный «Плюс», ООО «Жуковец», ООО «Выдвиженец Плюс», ЗАО «Земледелец-Северсталь», СПК «Верный», СПССК «Устюженский картофель» (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Харовский район. Лесопромышленное производство является основной отраслью данного района (ООО «Харовсклеспром»). Основные продукты производства: пиломатериалы, строганные и погонажные изделия, технологическая щепа. Развита пищевая промышленность: хлеб и хлебобулочные изделия, кондитерские изделия. Основной отраслью сельского хозяйства является животноводство (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Чагодощенский район. На территории данного района развито стекольное производство: ООО «Чагодощенский стеклозавод и К», ООО «Северная Стеклотарная компания», ПАО «Русджам-Покровский». Развита лесная промышленность: лесозаготовительное предприятие ООО «Чагнар», известковый завод (ООО "Северстройресурс"). Развита пищевая промышленность и представлена следующими предприятиями: ОАО «Белокрестский маслозавод», хлебозаводы ПО «Сазоновский хлебозавод» и ООО «Бейкер» (хлебобулочные, макаронных и кондитерские изделия) (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Экономика восточных районов Вологодской области. Бабушкинский район. К основным отраслям промышленности данного района относятся деревообрабатывающая промышленность, лесная промышленность, пищевая промышленность, а также сельское хозяйство (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Великоустюгский район. На данной территории преобладает лесная промышленность (лесозаготовительная, деревообрабатывающая). Основные

предприятия представленной промышленности - НАО «СВЕЗА Новатор», ООО «Ломоватка - лес», ООО «Лесток», ООО «Сухоналес», ООО «Великоустюгский ЛПХ», ООО «Премиум - лес», ООО «Новаторский ЛПК». Также развито производство пищевых продуктов, производство строительных материалов, электроэнергетика и производство изделий из серебра. А также сельское хозяйство, которое представлено следующими предприятиями «Двина», «Гледенский», «Усть-лён», ЗАО птицефабрика «Великоустюгская» (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Верховажский район. В данном районе развито обрабатывающее производство, отрасль сельского хозяйства, охота и лесное хозяйство (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Грязовецкий район. На данной территории развиты деревообрабатывающая промышленность: обработка древесины ООО «Вохтожский ДОК»; пищевая промышленность: производство пищевых продуктов ОАО «Северное Молоко», а также развита энергетика МУП «Грязовецкая Электротеплосеть». Широко развита сельское хозяйство, которое представлено следующими предприятиями: Племзавод-колхоз «Аврора», ЗАО Племзавод «Заря», Племзавод-колхоз им. 50 летия СССР, ООО «Покровское», ООО «Зазеркалье», С/А колхоз им. Калинина, СПК «Анохинский». Вологодский филиал АО «Шувалово» имеет статус племенного репродуктора по разведению Крупной Белой породы свиней и породы Ландрас (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Кич-Городецкий район. Основные отрасли, которыми занято население – леспромышленное производство (ЗАО «Мега»), пищевая промышленность (производство колбасных изделий ООО «Мясо»). На территории Кич-Городецкого района также развито сельское хозяйство. Здесь представлены следующие сельхозпредприятия: «Майский», «Правда», «Енангское», «Альянс» (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Никольский район. Широко развита лесная и деревоперерабатывающая промышленность, пищевая промышленность, швейное и текстильное производство, сельское хозяйство. Основная отрасль сельского хозяйства –

молочное и мясное животноводство, производство льноволокна (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Сямженский район. В Сямженском районе развиты лесная (лесозаготовка) и деревоперерабатывающая промышленность (деревообработка, деревянное домостроение): ООО «Сямженский леспромхоз», Сямженский лесхоз – филиал САУ лесного хозяйства ВО «Вологдалесхоз», ОАО «ДЭП №184», Сямженское ДРСУ ОАО «Вологдавтодор», Сямженское райпо. К пищевой промышленности относится предприятие – ПО Сямженский хлебозавод. Развито сельское хозяйство: животноводство - разведение птиц различных пород, овцеводство (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Тарногский район. На территории данного района развиты пищевая промышленность, сельское хозяйство, деревоперерабатывающая промышленность (заготовка и переработка древесины) (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

Тотемский район. Тотемский район является лидирующим районом в Вологодской области по сельскохозяйственной отрасли. Сельскохозяйственная отрасль представлена следующими предприятиями: МП Тотемская МТС «Плодородие». Широко развито животноводство. Развита пищевая отрасль: ООО СХП «Устюгмолоко», ООО «Тотемский маслозавод» и МП «Тотемский хлебокомбинат» (URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/).

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Сбор материала

В период с 2016-2023 год было проанализировано 1643 образца волос. В исследовании участвовали жители из различных районов Вологодской области. Вся выборка собранных проб волос была разделена на три группы: население промышленно-административного центра – город Череповец, город Вологда и ближайшие районы Шекснинский, Череповецкий и Вологодский, население которых работает на основных промышленных предприятиях региона, далее по тексту, в иллюстрациях и таблицах указано как город; сельское население восточных районов области (Кичменгско-Городецкий, Бабушкинский, Никольский, Великоустюгский, Тарногский, Верховажский, Сямженский, Грязовецкий, Тотемский районы); сельское население западных районов области (Вытегорский, Белозерский, Вашкинский, Вожегодский, Кадуйский, Харовский, Сокольский, Бабаевский, Чагодощенский, Устюженский, Кирилловский районы) (таблица 2, рисунок 5).

Таблица 2 – Количество проб волос из разных районов Вологодской области

Район исследования	Количество исследуемых
Череповец	820
Шекснинский район	125
Череповецкий район, Вологодский район	13
Западные районы	
Бабаевский	110
Белозерский	33
Вытегорский	54
Кадуйский	21
Кирилловский	86
Сокольский	37
Другие: Вашкинский, Вожегодский, Харовский, Чагодощенский, Устюженский	17
Восточные районы	
Кич-Городецкий	26

Пробы волос отбирали согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения, с помощью хирургических ножниц из нержавеющей стали у людей в виде пряди с затыльной части головы, толщиной несколько мм (UNEP, WHO, 2008). Образцы волос упаковывали в индивидуальный бумажный конверт и хранили в полиэтиленовом пакете, при комнатной температуре.

Анкетирование. При сборе волос, человек заполнял анкету, в которой указывал: пол, возраст, место проживания, частоту потребления рыбных продуктов, объем потребляемой рыбы в месяц (грамм/месяц), отношение к курению. Каждый человек подписывал соглашение на участие в исследовании. Для детей и других участников в возрасте до 18 лет, было запрошено разрешение родителей. Данное исследование было выполнено в соответствии с принципами этики Всемирной медицинской Ассоциации (Хельсинкская декларация) для экспериментов с участием человека (Глашев, 2004; Williams, 2015). Программа научного исследования обсуждалась и одобрена Комиссией по биоэтике Череповецкого государственного университета и Департаментом здравоохранения Вологодской области (№ 2–1/55 от 18.01.2019).

В исследовании приняли участие 1643 человек (502 мужчин и 1135 женщин), в возрасте от 4 месяцев до 84 лет. Всемирная организация здравоохранения (WHO, 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).

В зависимости от потребления рыбы в данной работе были разделены на 4 группы: потребление рыбы менее 1 раза в месяц, 1-2 раза в месяц, 1 раз в неделю, несколько раз в неделю.

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 у которых преобладает рыба.

3.2. Определение ртути

Содержание ртути определяли в волосах от корня длиной примерно 2 см. Волосы предварительно взвешивали в кварцевой ложечке на аналитических весах. Затем, бидистиллированной водой смачивали волосы для того, чтобы при переноске от весов к прибору не потерялись пробы.

Содержание ртути в волосах определяли методом пиролиза с помощью атомно-адсорбционного спектрометра РА-915М оснащенного пиролитической приставкой ПИРО-915+ (ООО «Люмэкс», Санкт-Петербург, Россия) (рисунок 7).



Рисунок 7 – Ртутный анализатор «РА-915М» с пиролитической приставкой «ПИРО 915+»

Диапазон измерений в биопробах от 0,001 до 20 мг/кг. Время измерения содержания ртути не превышает 2-х минут. 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 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 %).

Для проверки точности анализа прибора, измеряют содержание ртути в эталонных образцах с известной концентрацией ртути (таблица 3).

Таблица 3 – Проверка точности анализа прибора

Стандартный справочный материал	N	Сертифицированное значение	Получено среднее значение
DORM – 4	3	0,412	0,397
DOLT – 5	3	0,440	0,430
NIMD-1	3	0,794	0,780

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 (рисунок 8).



Рисунок 8 – Изотопный масс-спектрометр Thermo Delta V Advantage с газовым интерфейсом ConFlo IV и элементном анализаторе EA Isolink Flash IRMS

Перед анализом, волосы гомогенизировали и измельчали в порошок, используя вибрационную мельницу (Retsch MM 400), затем промывали 3 раза по 40 мин в ультразвуковой ванне (Derui Ultrasonic Cleaner DR-MS07) до прозрачного раствора в хлороформ-метаноле (2:1) для удаления липидов (O'Connell et al., 2001). После промывания образцы подвергали сублимационной сушке в течение 2 суток. Высушенные образцы волос для анализа взвешивали и упаковывали в оловянные капсулы. Вес образцов волос для изотопного анализа составлял от 297 до 363 микрограмм.

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.

Измерения веса волос и стандартных образцов проводились в лабораторных условиях при температуре $22 \pm 1 \text{ °C}$ и относительной влажности $30 \pm 5\%$ на весах Mettler Toledo WXTS3DU (точность 1 мкг).

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

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

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

Сущность метода изотопной масс-спектрометрии заключается в разделении ионизированных молекул по их массам за счет воздействия электромагнитного поля. Измерение проводится с использованием пиролитического или окислительного реактора EA Isolink. Образцы (навески) подаются в реактор с помощью автосемплера. Пиролиз происходит на графитовом наполнителе реактора в атмосфере чистого гелия или кислорода при температуре $1020\text{°C} - 1450\text{°C}$. При этом содержащийся в пробе азот превращается в N_2 , углерод – в CO_2 . Продукты пиролиза подаются на изотопный масс-спектрометр Thermo Fisher Delta V Advantage через газовый интерфейс ConFlo IV.

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

Согласно методу, установленным Всемирной организацией здравоохранения (UNEP, WHO, 2008), формула для определения допустимого ежедневного потребления рыбы г/день следующая:

$$\text{CR lim} = \frac{\text{RFD} * \text{BW}}{\text{Cm}}, (2)$$

CR lim – допустимое ежедневное потребление рыбы кг/день;

RFD - допустимое ежедневное поступление ртути в организм человека равное 0,1 мкг/кг массы тела в день;

BW – масса тела человека, кг;

Cm – концентрация ртути в рыбе, мкг/кг.

На основании отчета Агентства по охране окружающей среды US EPA указано, что поступление ртути в организм человека 0,1 мкг/кг массы тела/в день – это рекомендуемая эталонная доза (RfD) для метилртути, и соответствует 1 мгHg/кг в волосах. Зная, концентрации ртути в волосах у каждого человека, мы рассчитали ежедневное поступление металла и внесли новую переменную (A), заменив RfD.

Преобразованная формула расчета ежедневного поступления ртути в организм человека на массу тела выглядит следующим образом:

$$A = \frac{RFD * C_{hair}}{1 \text{ mgHg/kg}}, (3)$$

A – фактическое ежедневное поступление ртути в организм человека, мкг/кг массы тела в день;

C_{hair} –измеренная концентрация ртути в волосах, мг/кг;

RFD – допустимое ежедневное поступление ртути в организм человека равное 0,1 мкг/кг массы тела в день.

Далее, в формуле (2) имеется значение CR lim — это допустимое ежедневное потребление рыбы кг/день.

При этом, согласно анкетным данным, каждый участник указывал сколько грамм рыб он ест в день. Таким образом, вместо **CR lim** подставили уже известное количество съеденной рыбы и заменили на новую переменную **CR** –потребление рыбы кг/день, согласно опроснику.

Заменив RFD на A (поступление ртути для каждого), CR lim на CR (потребление рыбы кг/день, согласно опроснику), вывели формулу для расчета концентрации ртути в рыбе:

$$Cm = \frac{A * BW}{CR}, (4)$$

Cm – концентрация ртути в рыбе, мкг/кг;

A – 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.

Используя формулу (2), (заменив две переменные, получив формулу (4)) мы рассчитали для каждого исследованного человека с какой концентрацией ртути рыба поступает в его организм. Данные расчеты усреднили и привели для каждой изучаемой выборки: населения промышленно-административного центра, населения восточных и населения западных районов области.

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 трех 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

В мире широко проводятся исследования по содержанию ртути в районах золотодобычи и в прибрежных районах. На территориях Российской Федерации, удаленных от источников ртути, данные по содержанию ртути ограничены, в связи с этим, было установлено фоновое значение ртути для населения Северо-Запада России, на примере 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 4).

Таблица 4 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах жителей Вологодской области различных районов

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 9).

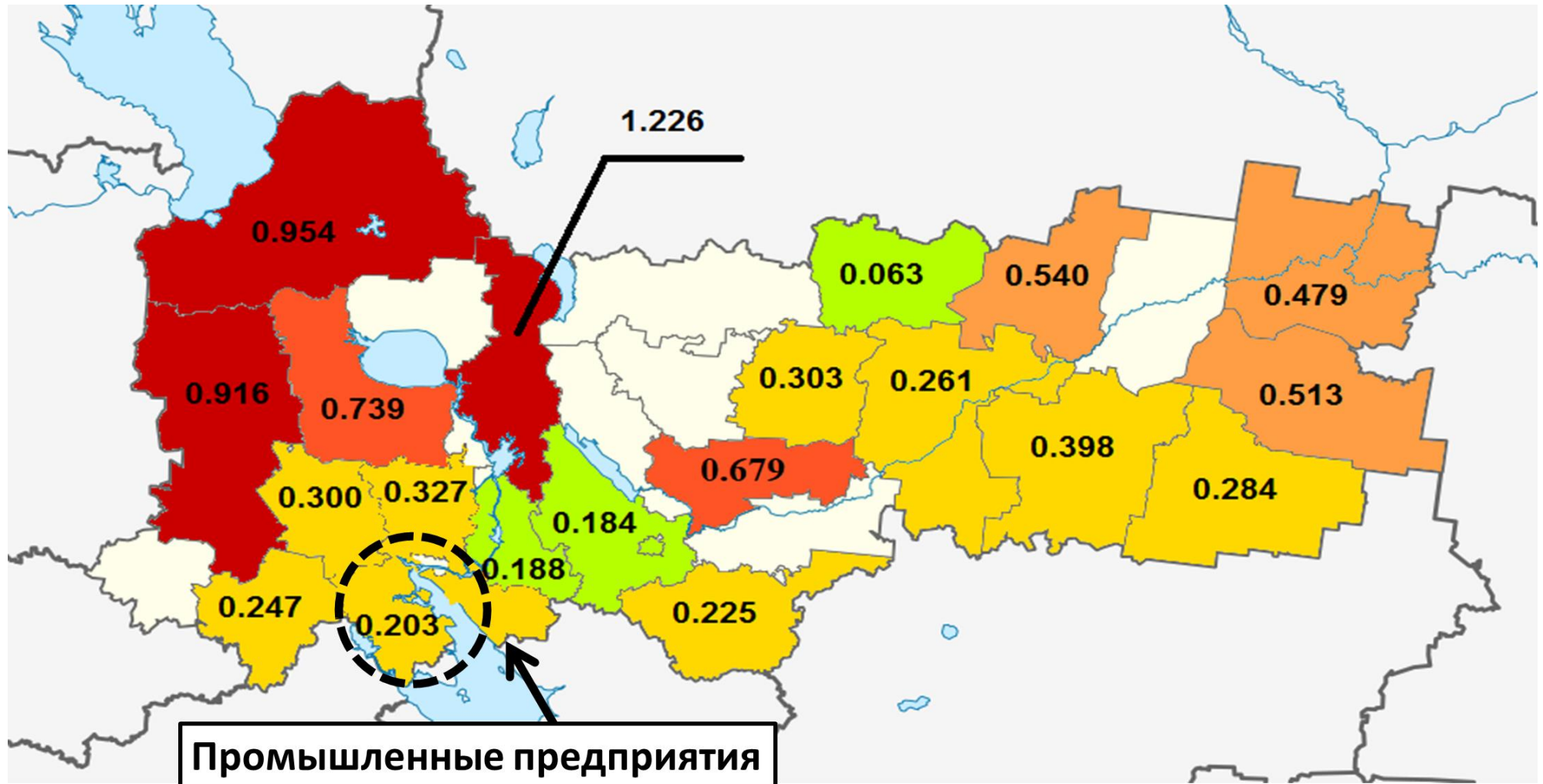


Рисунок 9 – Карта-схема распределения концентраций ртути (мг/кг) в волосах жителей различных районов Вологодской области

Минимальное среднее значение отмечено в волосах у городского населения $0,307 \pm 0,014$ мг/кг, промежуточные у сельского населения восточных районов ($0,367 \pm 0,023$ мг/кг), высокие значения отмечены в волосах населения из западных районов ($0,884 \pm 0,063$ мг/кг) (таблица 4, рисунок 10).

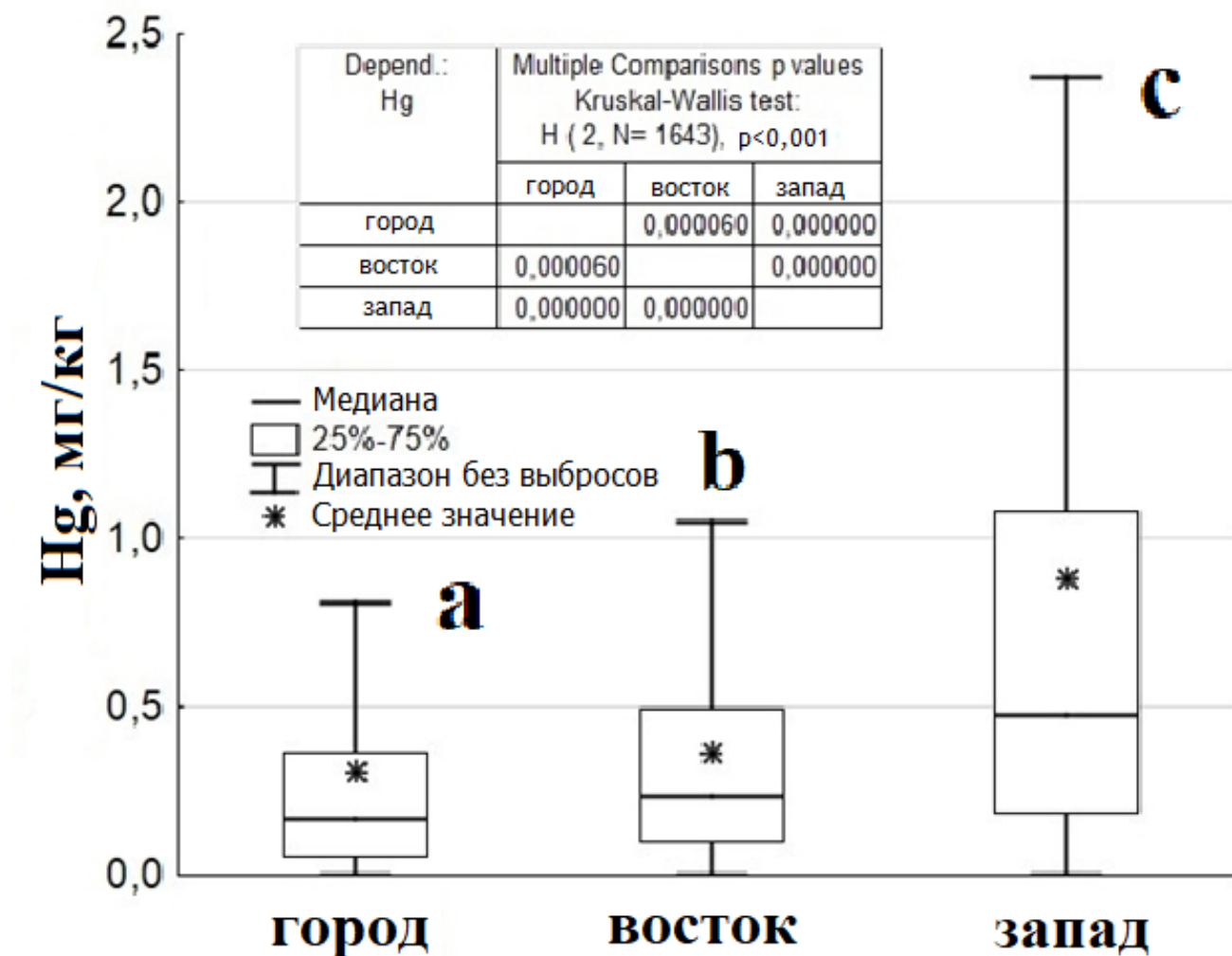


Рисунок 10 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения, проживающего в различных районах Вологодской области. Примечание: здесь и далее в рисунках буквенные индексы обозначают статистически значимые различия при $p < 0,05$.

Основная часть выборки имела уровни ртути в волосах меньше 1 мг/кг. У 10,7 % исследованных отмечены концентрации металла, превышающие 1 мг/кг.

Частотное распределение ртути в пробах волос западного сельского населения отличалось от распределения для населения промышленно-административного центра и восточных районов (рисунок 11).

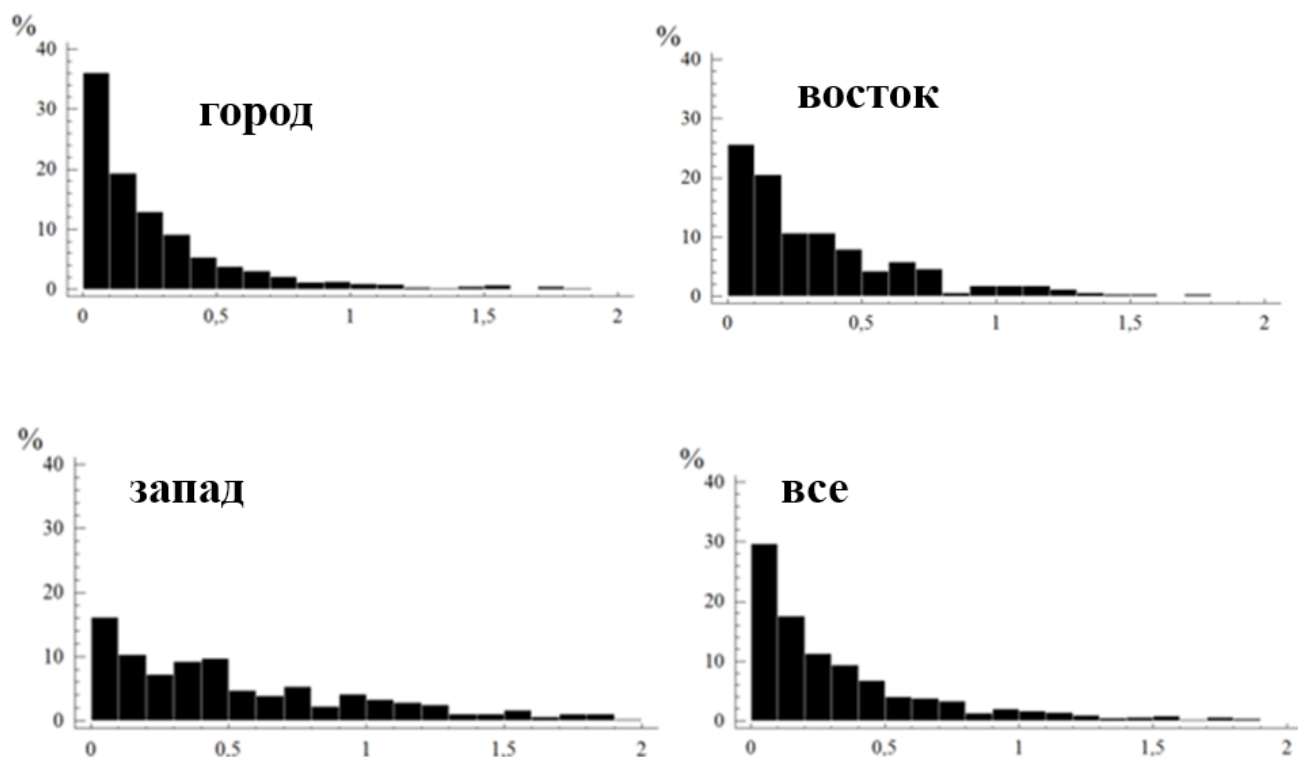


Рисунок 11 – Частотное распределение ртути в волосах у 1643 участников исследования

Для западных районов, концентрации ртути до 0,1 мг/кг были отмечены у 16% обследованных, в то время как для восточных у 26%, у 36% для промышленно-административного центра. Уровни ртути 0,1 – 0,5 мг/кг отмечены для западных районов у 36,6%, для восточных у 49,9% и у 46,9% для промышленно-административного центра. Содержание ртути в волосах в пределах 0,5 – 1 мг/кг отмечались у 20,4% обследованных с западной части области, у 17,1 % населения восточных районов, у городского населения отмечены у 11,5 %. Превышение 1 мг/кг ртути в волосах отмечено у 26,8 % - населения западных районов, у 7,3 % - населения восточных районов, 5,7 % городского населения (рисунок 12).

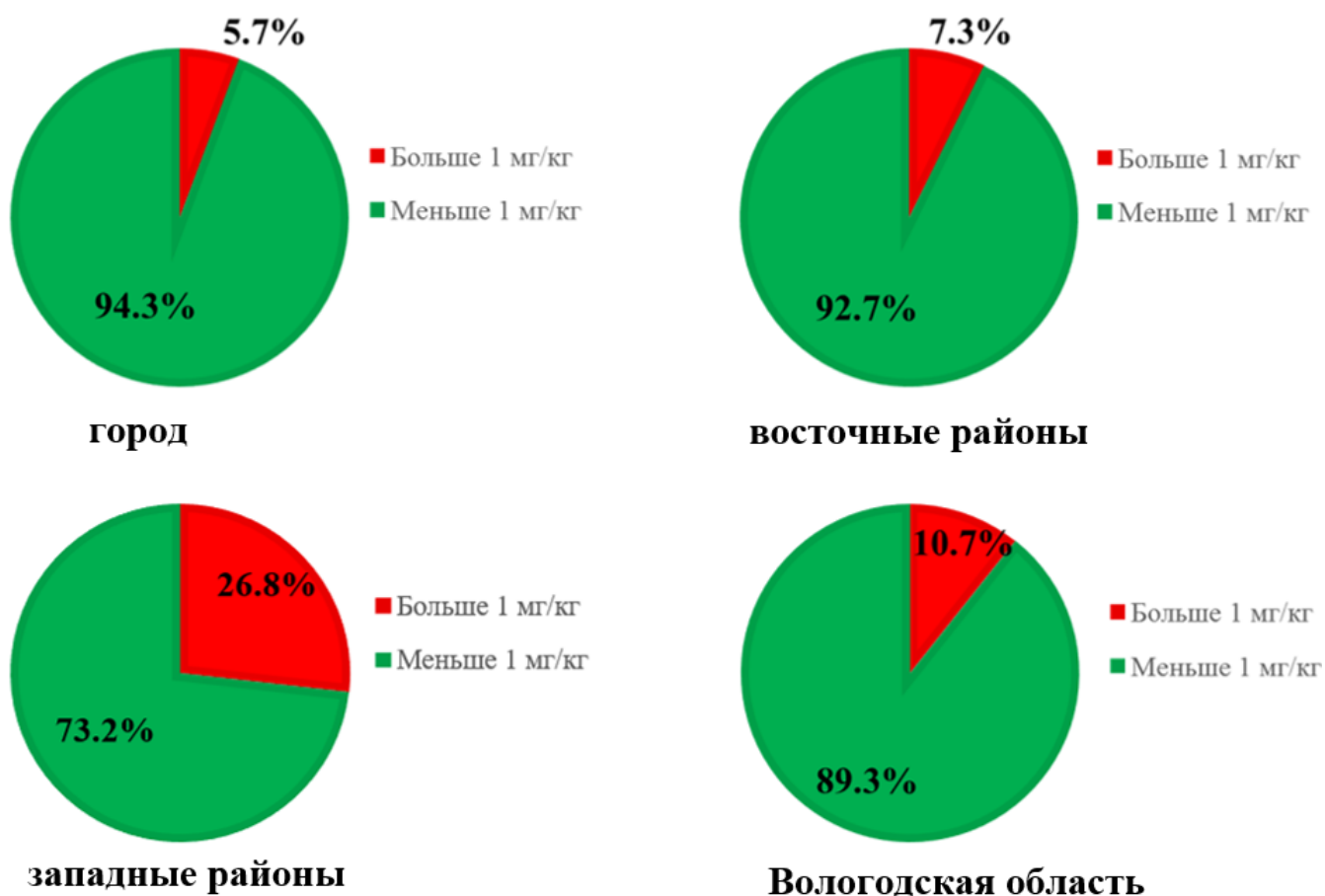


Рисунок 12 – Процентное соотношение уровней ртути в волосах жителей Вологодской области

Доля жителей западных районов с концентрацией ртути выше 1 мг/кг значительно выше, чем в промышленно-административном центре ($\chi^2(1) = 113,95$, $p < 0,001$), и в восточных районах ($\chi^2(1) = 44,86$, $p < 0,001$). При этом, распределении частот концентрации ртути (< 1 мг/кг и ≥ 1 мг/кг) между населением промышленно-административного центра и восточных районов статистически значимо не различаются ($\chi^2(1) = 1,08$; $p = 0,299$).

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 5).

Таблица 5 – 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

При сравнении содержания ртути с нормативными значениями, установлено, что доля мужчин со значениями ртути выше нормативных, проживающих в западных районах значимо отличается по сравнению с мужчинами из восточных районов ($\chi^2(1) = 15,97$, $p < 0,001$) и промышленно административного центра ($\chi^2(1) = 30,67$, $p < 0,001$) (рисунок 13).

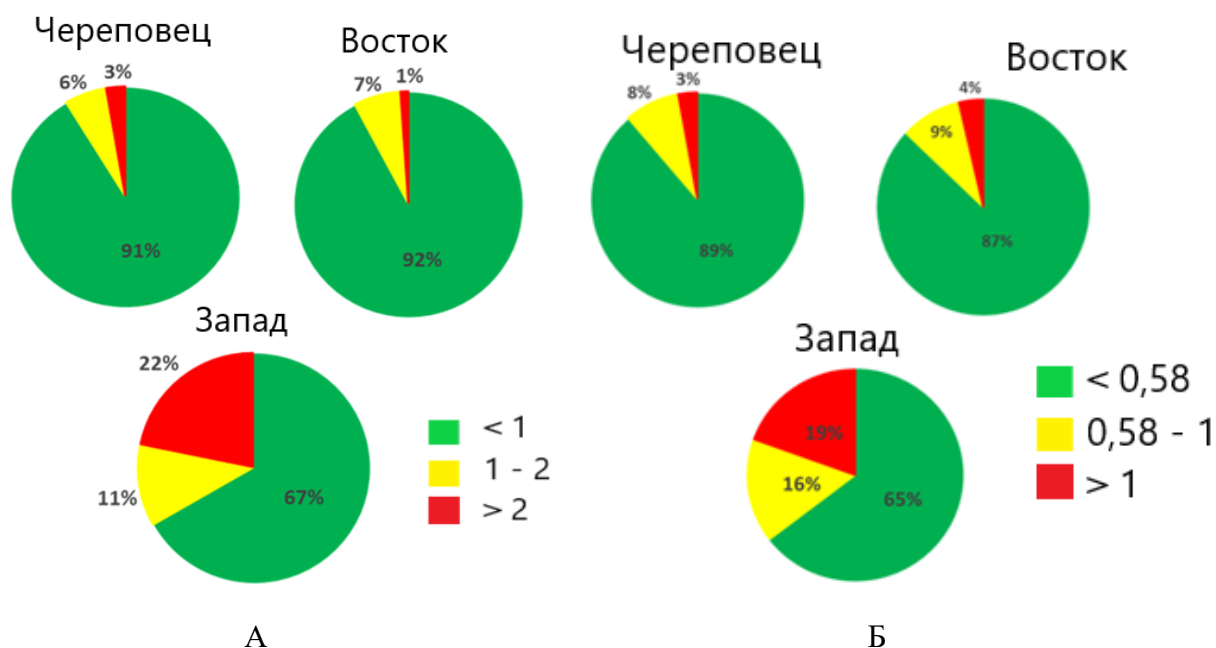


Рисунок 13 – Сравнение содержания ртути в волосах мужчин (А) и женщин (Б) с рекомендованными уровнями. Примечание: 0,58 мг/кг – риски нарушения пренатального развития (Bellanger et al., 2013); 1 мг/кг – риски для здоровья у взрослого населения (Diez et al., 2011); 2 мг/кг – риск сердечно-сосудистых заболеваний (Hu et al., 2021; Salonen et al., 1995)

Установлено, что доля женщин со значениями ртути выше нормативных, проживающих в западных районах значимо отличается по сравнению с мужчинами из восточных районов ($\chi^2(1) = 12,79$, $p < 0,001$) и промышленно административного центра ($\chi^2(1) = 35,45$, $p < 0,001$).

При этом, распределении частот концентрации ртути (< 1 мг/кг и ≥ 1 мг/кг) между населением промышленно-административного центра и восточных районов статистически значимо не различаются как для мужчин ($\chi^2(1) = 1,08$; $p = 0,299$) так и для женщин ($\chi^2(1) = 0,78$; $p = 0,377$).

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 6).

Таблица 6 – 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

Для городского населения среднее содержание ртути в возрастной группе до 18 лет – $0,172 \pm 0,013$ мг/кг, 18-29 лет – $0,209 \pm 0,015$ мг/кг, 30-44 лет – $0,461 \pm 0,037$ мг/кг, старше 44 лет – $0,700 \pm 0,066$ мг/кг. Для сельского населения восточных районов – среднее содержание ртути в возрастной группе до 18 лет – $0,224 \pm 0,032$ мг/кг, 18-29 лет – $0,258 \pm 0,023$ мг/кг, 30-44 лет – $0,496 \pm 0,051$ мг/кг, старше 44 лет – $0,653 \pm 0,076$ мг/кг. А для сельского населения западных районов отмечены самые высокие значения ртути по возрастным категориям. Среднее содержание ртути в

возрастной группе до 18 лет – $0,640 \pm 0,122$ мг/кг, 18-29 лет – $0,396 \pm 0,061$ мг/кг, 30-44 лет – $1,215 \pm 0,177$ мг/кг, старше 44 лет – $1,198 \pm 0,109$ мг/кг (рисунок 14).

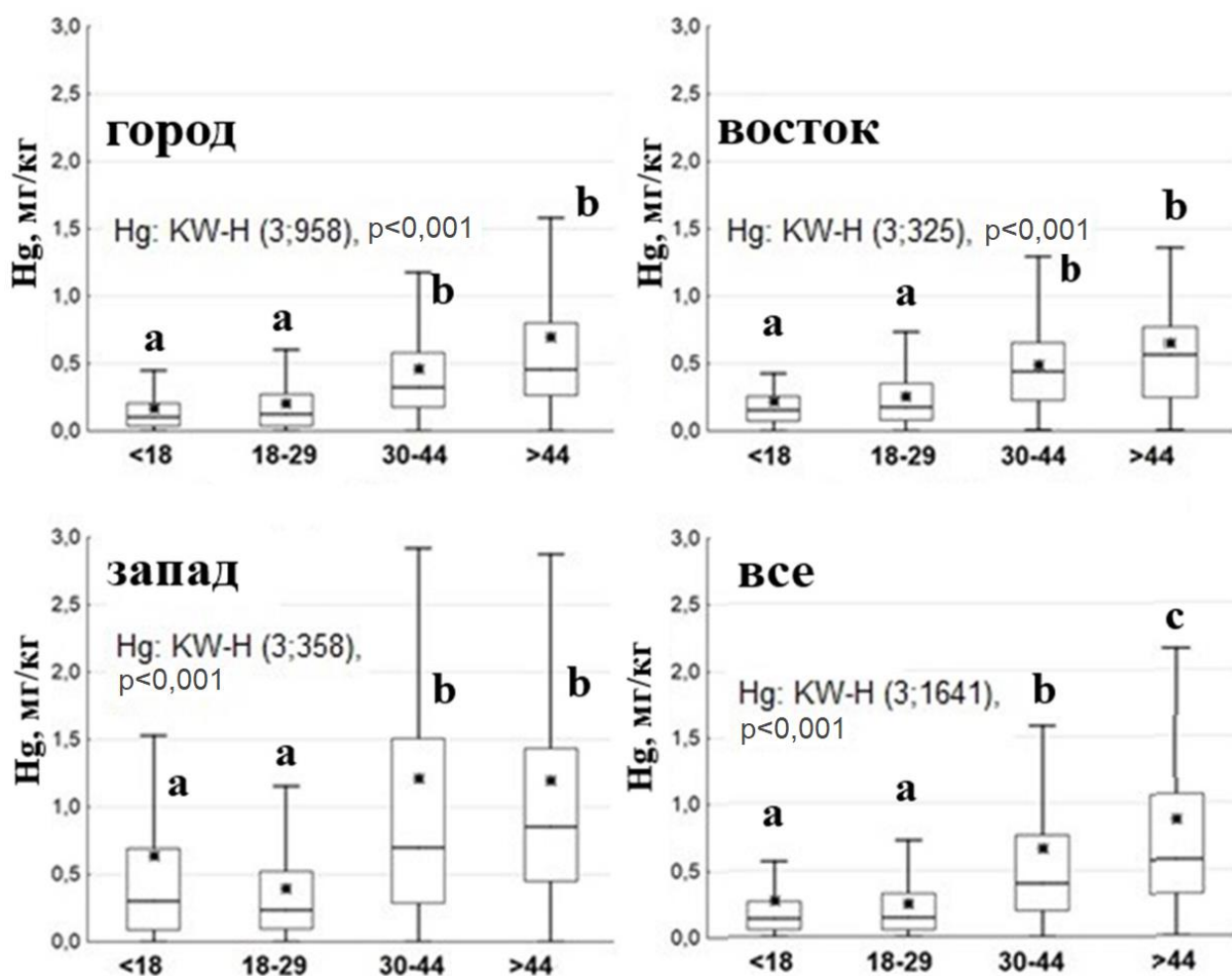


Рисунок 14 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения Вологодской области разных возрастных групп

Содержание ртути в волосах жителей Вологодской области положительно коррелирует с их возрастом ($r_s=0,435$, $p < 0,001$). Значения корреляция 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 15).

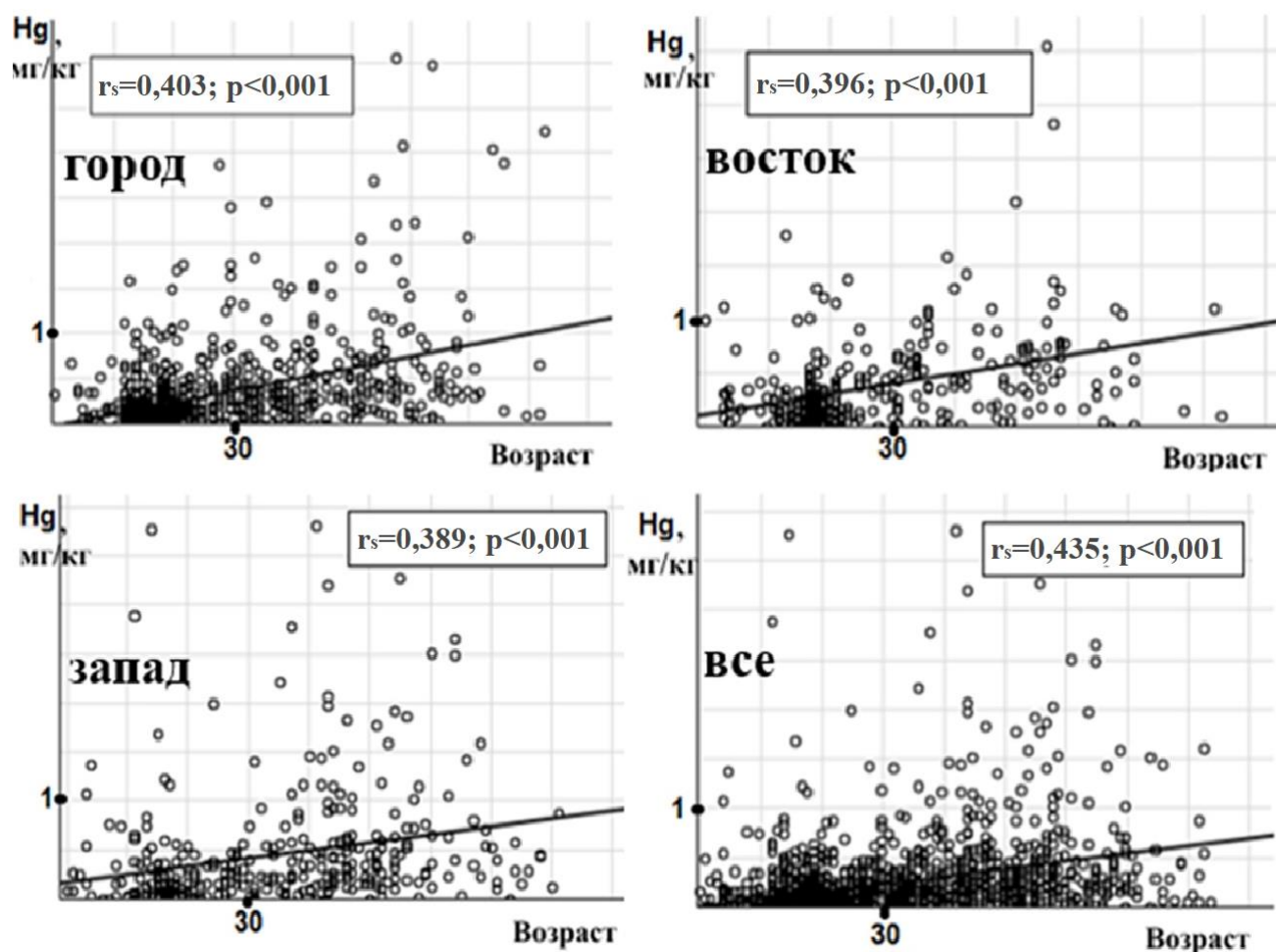


Рисунок 15 – Корреляционная связь между содержанием ртути (мг/кг) в волосах и возрастом

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 7, рисунок 16).

Таблица 7 – 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	Раз- личия
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

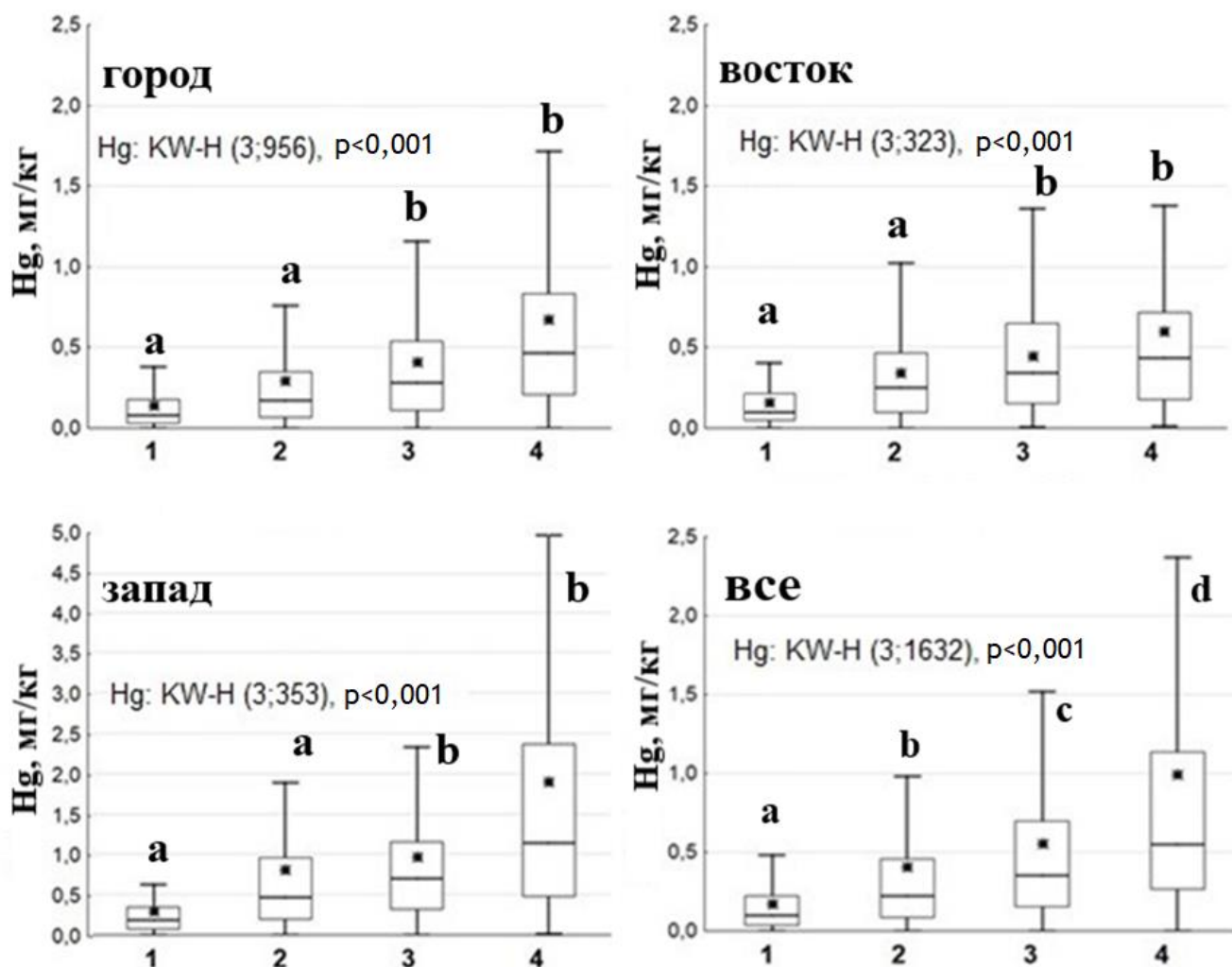


Рисунок 16 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах населения Вологодской области с разной частотой потребления рыбы в рационе питания (1– менее раза в месяц, 2 – 1-2 раза в месяц, 3 – 1 раз в неделю, 4 – несколько раз в неделю).

Различия по содержанию ртути в волосах установлены при сравнении потребления рыбы у городского и сельского населения западных и восточных районов. У городского населения: среднее содержание ртути в волосах людей, которые употребляют рыбу менее 1 раза в месяц составляет – $0,139 \pm 0,011$ мг/кг; употребляют рыбу 1-2 раза в месяц – $0,296 \pm 0,021$ мг/кг; 1 раз в неделю – $0,410 \pm 0,034$ мг/кг; несколько раз в неделю – $0,675 \pm 0,083$ мг/кг. У сельского населения восточных районов среднее содержание ртути в волосах людей, которые употребляют рыбу менее 1 раза в месяц составляет – $0,162 \pm 0,021$ мг/кг; употребляют рыбу 1-2 раза в месяц – $0,341 \pm 0,031$ мг/кг; 1 раз в неделю – $0,448$

$\pm 0,040$ мг/кг; несколько раз в неделю – $0,599 \pm 0,110$ мг/кг. У сельского населения западных районов уровни Hg в волосах людей, которые употребляют рыбу менее 1 раза в месяц составляет – $0,299 \pm 0,045$ мг/кг; употребляют рыбу 1-2 раза в месяц – $0,804 \pm 0,090$ мг/кг; 1 раз в неделю – $0,965 \pm 0,092$ мг/кг; несколько раз в неделю – $1,897 \pm 0,298$ мг/кг (рисунок 16). Установлено, что доля людей, регулярно потребляющих рыбу, достоверно выше среди сельского населения по сравнению с городским ($\chi^2(1) = 7,88, p = 0,05$).

Корреляционная связь между содержанием ртути и количеством употребляемой рыбы установлена как по всей выборке ($r_s=0,427$), так и по отдельности в городе ($r_s=0,436$) и сельской местности на востоке ($r_s=0,327$) и западе ($r_s = 0,458$) Вологодской области (рисунок 17).

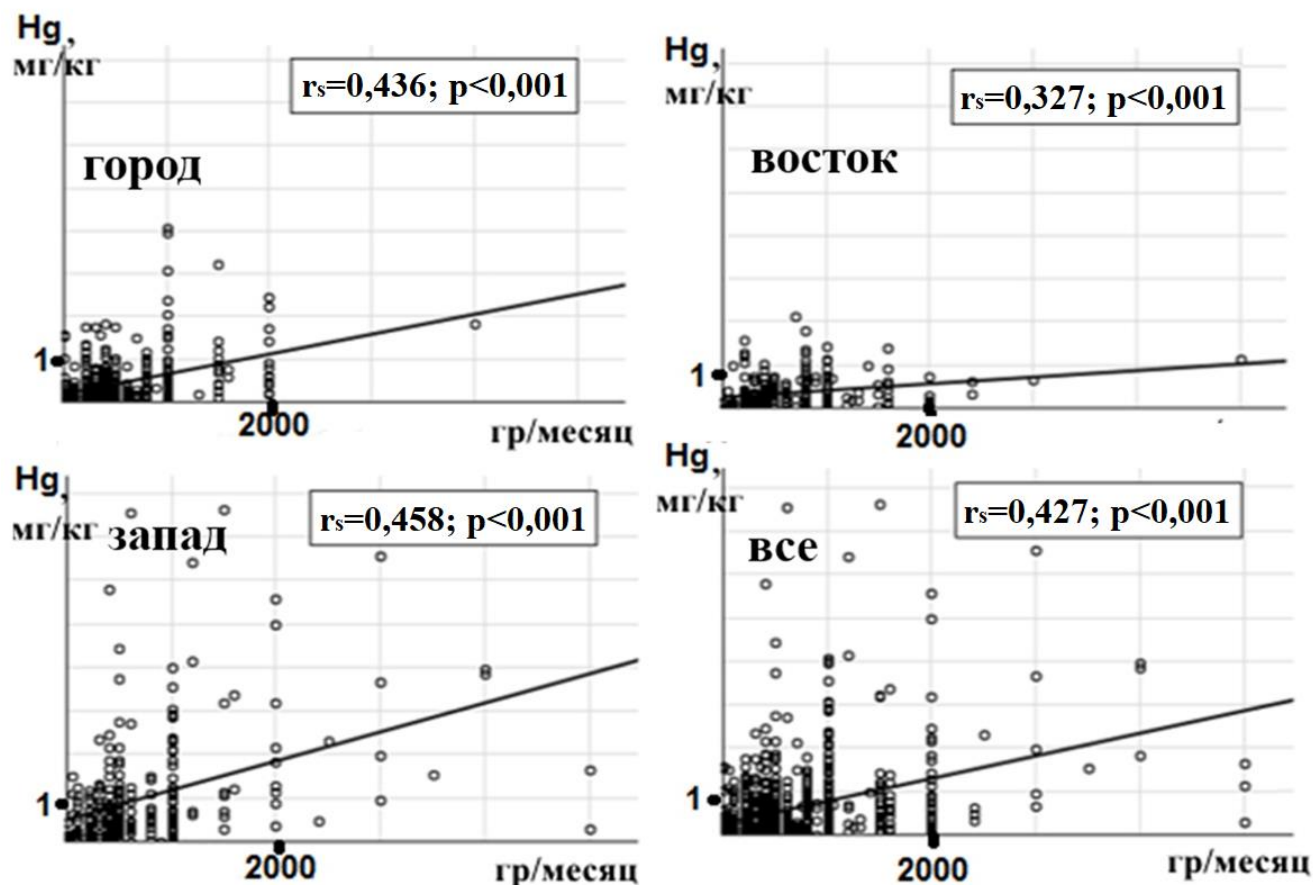


Рисунок 17 – Корреляционная связь между содержанием ртути в волосах и количеством потребляемой рыбы (гр/месяц)

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 (таблица 8, рисунок 18).

Таблица 8 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах жителей Вологодской области у курящих и некурящих людей

Территория исследования	Mean	Median	SD	SE	Min-Max	Различия
Вологодская область						
Курят (n=308)	0,514	0,287	0,784	0,045	0,001-6,559	a
Не курят (n=1316)	0,426	0,204	0,698	0,019	0,001-7,640	b
Городское население						
Курят (n=162)	0,328	0,228	0,380	0,030	0,001-2,064	a
Не курят (n=790)	0,300	0,156	0,456	0,016	0,001-4,056	b
Сельское население восточных районов						
Курят (n=74)	0,325	0,243	0,299	0,035	0,001-1,359	a
Не курят (n=244)	0,377	0,233	0,439	0,028	0,001-3,548	a
Сельское население западных районов						
Курят (n=72)	1,126	0,683	1,319	0,155	0,038-6,559	a
Не курят (n=282)	0,823	0,458	1,151	0,068	0,001-7,640	b

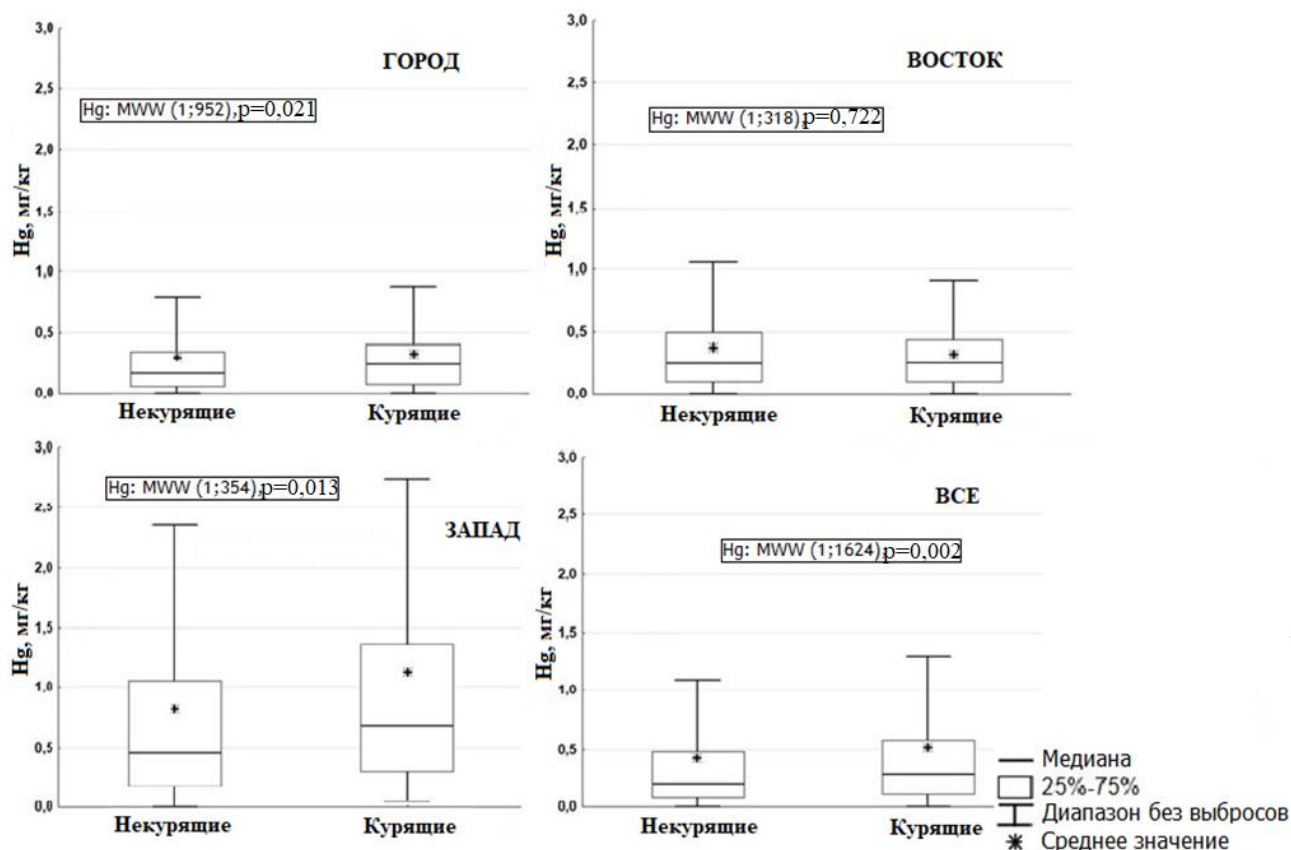


Рисунок 18 – Содержание ртути (мг/кг) у некурящих и курящих людей.

ГЛАВА 5. Содержание ртути (мг/кг) и соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах жителей Вологодской области

С 1980-х годов значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах использовались для интерпретации и идентификации пищевых привычек человека. Метод изотопной масс-спектрометрии требует дорогостоящих расходных материалов. На анализ соотношение стабильных изотопов азота и углерода всю выборку невозможно было проанализировать. Поэтому, на изотопный анализ была отобрана выборка, которая по содержанию ртути и возрастным пределам соответствовала общей выборки.

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

Для определения изотопного состава азота и углерода в волосах, была отобрана выборка. Отобранная для анализа изотопов выборка в целом ($n=348$), в городе ($n=241$), на востоке ($n=43$), на западе ($n=64$) соответствовали по средним значениям и распределениям ртути в волосах (рисунок 19).

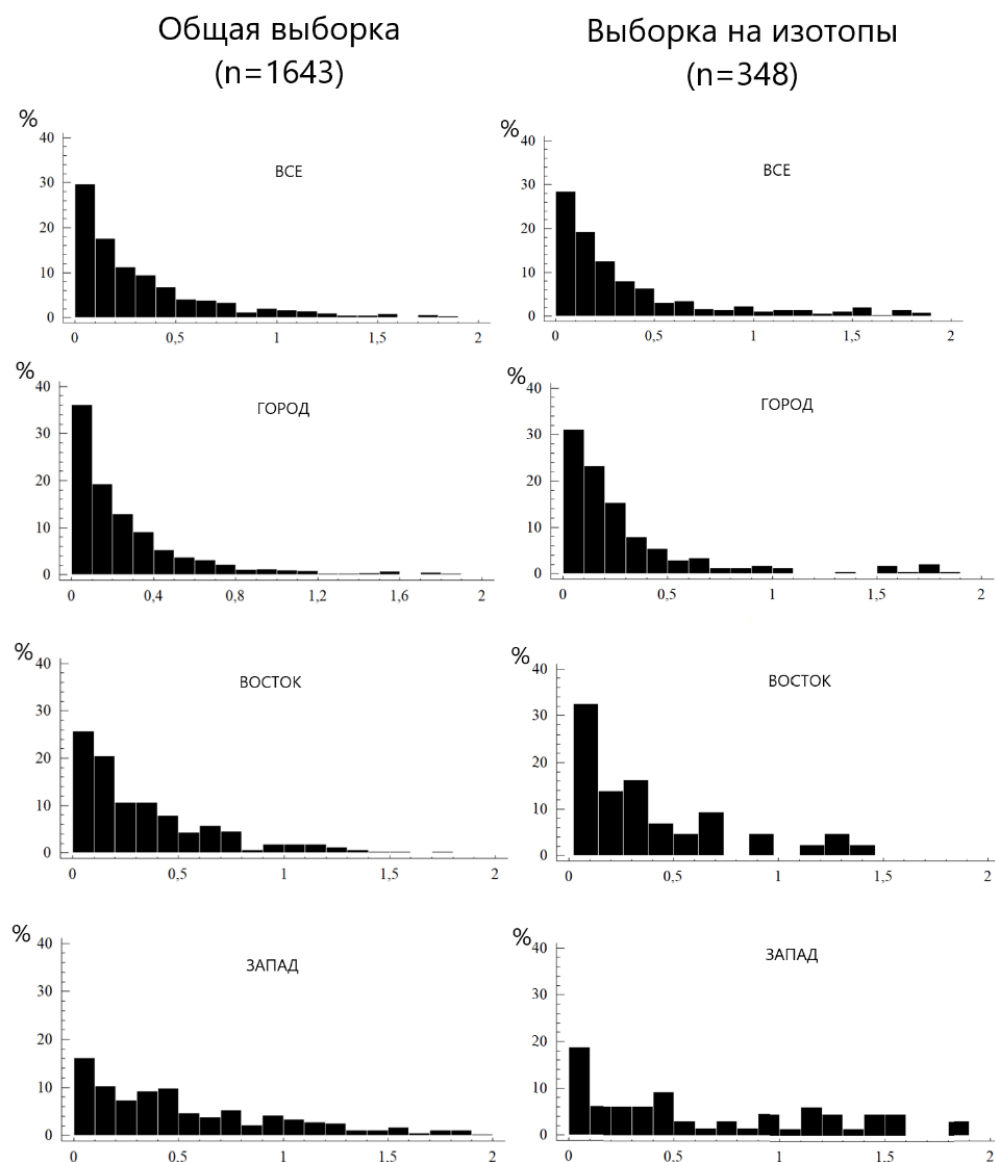


Рисунок 19 – Частотное распределение значений ртути в волосах общей выборки и изотопной по исследуемым районам

Содержание ртути в волосах изучаемой выборки ($0,46 \pm 0,04$ мг/кг) сопоставимо с результатами ртути общей выборки ($0,445$ мг/кг), тому, что было рассмотрено в предыдущей главе 4. Также исследуемая выборка соответствовала общей выборке по возрасту (таблица 9).

Таблица 9 – Среднее содержание ртути (мг/кг) и средний возраст общей выборке, рассмотренной в предыдущей главе и изотопной выборки

Территория исследования	Общая выборка		Выборка на изотопный анализ	
	Hg, мг/кг	Возраст, года	Hg, мг/кг	Возраст, года
Вологодская область	0,45	28	0,46	28
Городское население	0,31	26	0,31	25
Сельское население восточных районов	0,37	28	0,43	30
Сельское население западных районов	0,88	34	1,03	37

Содержание ртути в волосах изучаемой выборки составляет $0,46 \pm 0,04$ мг/кг.

Отмечены различия по содержанию ртути и значениям $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в волосах между городским и сельским населением. Содержание ртути и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах статистически значимо выше у сельского населения ($0,79$ мг/кг, $9,98$ ‰), по сравнению с городским ($0,31$ мг/кг, $9,75$ ‰). При этом, значение $\delta^{13}\text{C}$ в волосах статистически значимо выше у городского населения ($-20,87$ ‰) по сравнению с сельским ($-21,22$ ‰) (таблица 10).

Таблица 10 – Содержание ртути (мг/кг), $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ (‰) в волосах городского и сельского населения

Население		N	Mean	Median	SD	SE	Min-Max	Различия
Городское	Hg	241	0,31	0,18	0,41	0,03	0,001-2,47	a
	$\delta^{15}\text{N}$	241	9,75	9,79	0,59	0,04	6,98-11,11	a
	$\delta^{13}\text{C}$	241	-20,87	-20,81	0,65	0,04	(-24,21)- (-19,14)	b
Сельское	Hg	107	0,79	0,42	1,05	0,10	0,001-6,80	b
	$\delta^{15}\text{N}$	107	9,98	10,00	0,48	0,05	8,93-11,12	b
	$\delta^{13}\text{C}$	107	-21,22	-21,30	0,61	0,06	(-22,70)- (-19,16)	a

Отмечены различия по содержанию ртути и значениям $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ между восточным сельским и западным сельским населением. Содержание ртути и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах статистически значимо выше у западного населения (1,03 мг/кг, 10,02 ‰) по сравнению с восточным (0,43 мг/кг, 9,92 ‰). Значение $\delta^{13}\text{C}$ в волосах статистически значимо выше у восточного населения (-21,03 ‰) по сравнению с сельским (-21,34 ‰) (таблица 11).

Таблица 11 – Содержание ртути (мг/кг) и соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах исследуемой выборки

Население		Mean	Median	SD	SE	Min-Max	Различия
Вологодская область (n=348)	Hg	0,46	0,22	0,71	0,04	0,001-6,80	
	$\delta^{15}\text{N}$	9,82	9,84	0,57	0,03	6,98-11,12	
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,98	-20,94	0,66	0,04	(-24,21)-(-19,14)	
Городское население (n=241)	Hg	0,31	0,18	0,41	0,03	0,001-2,47	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,75	9,79	0,59	0,04	6,98-11,11	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,87	-20,81	0,65	0,04	(-24,21)-(-19,14)	b
Сельское население восточных районов (n=43)	Hg	0,43	0,30	0,46	0,07	0,03-2,11	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,92	9,86	0,42	0,06	9,09-10,99	ab
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,03	-21,03	0,61	0,09	(-22,18)-(-19,16)	b
Сельское население западных районов (n=64)	Hg	1,03	0,64	1,25	0,16	0,001-6,80	b
	$\delta^{15}\text{N}$	10,02	10,05	0,52	0,06	8,93-11,12	b
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,34	-21,35	0,59	0,07	(-22,70)-(-20,12)	a

Исходя из статистически значимых различий внутри группы сельского населения, при дальнейшем анализе данных, группы сельское население восточных районов и сельское население западных районов рассматривали как отдельные выборки.

Содержание ртути в волосах статистически значимо выше у западного населения области ($1,03 \pm 0,16$ мг/кг), по сравнению с восточным ($0,43 \pm 0,07$ мг/кг), и городским населением ($0,31 \pm 0,03$ мг/кг) (таблица 11, рисунок 20).

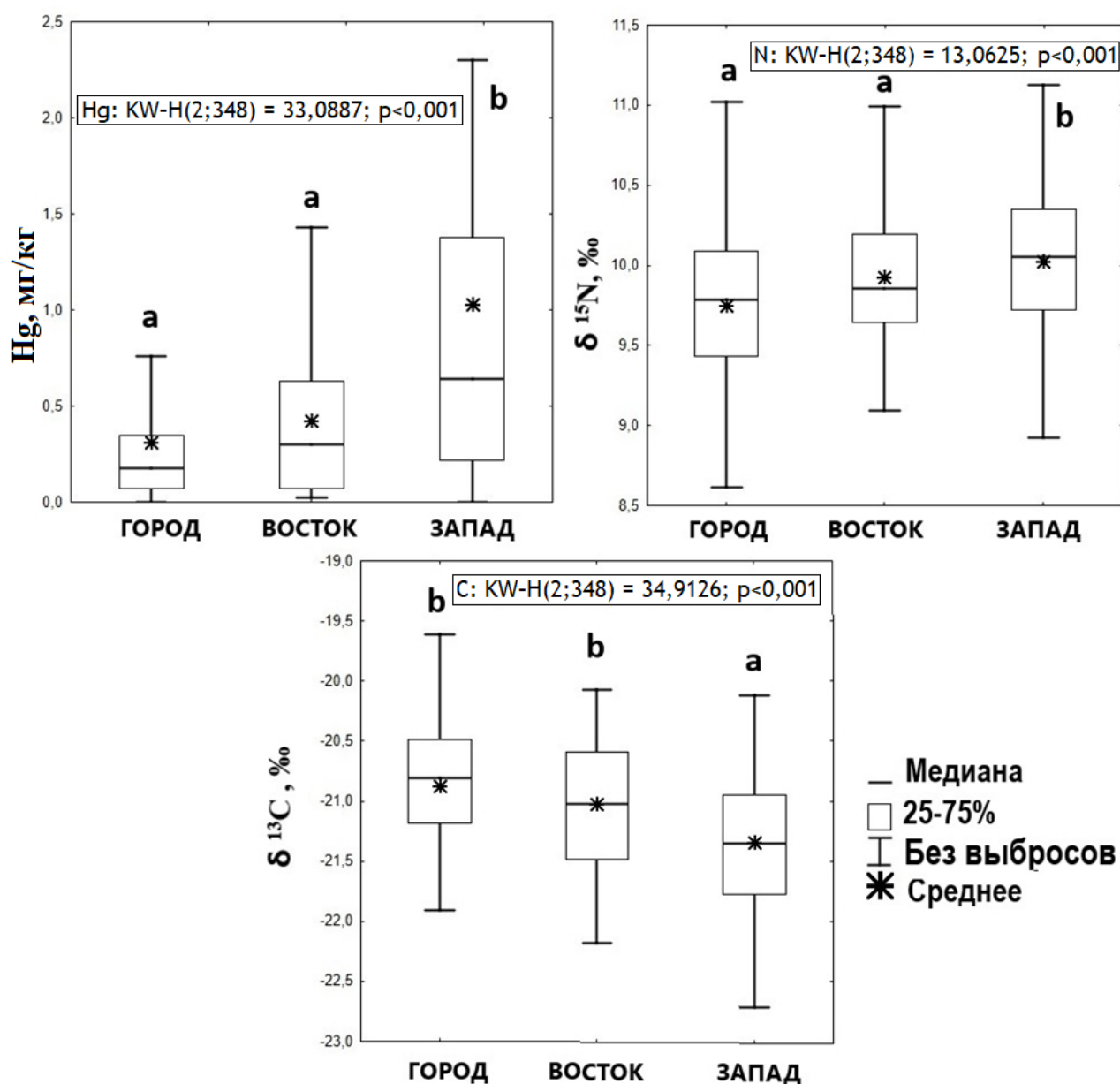


Рисунок 20 – Содержание ртути (мг/кг) и величин $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ (‰) в волосах населения Вологодской области.

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 ($9,75 \pm 0,04 \text{‰}$) (таблица 11, рисунок 20).

Соотношение изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в волосах исследуемой выборки составляет $-20,98 \text{‰}$. Значение $\delta^{13}\text{C}$ статистически значимо выше у городского (-

20,87 ‰) и у сельского населения востока (-21,03 ‰), минимальные у сельского населения запада (-21,34‰). Значения углерода не отличаются между городом и востоком, при этом на западе достоверно ниже по сравнению с городом и востоком (таблица 11, рисунок 20).

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 ($\delta^{13}\text{C} = -20,87 \pm 0,04\text{‰}$) чем у сельского населения восточных и западных районов ($\delta^{13}\text{C} = -21,03 \pm 0,09\text{‰}$ и $-21,34 \pm 0,07\text{‰}$, соответственно). При этом для населения западных районов величина $\delta^{13}\text{C}$ статистически значимо ниже по сравнению с населением города и восточных районов (таблица 11, рисунок 20).

Выявлены положительные корреляционные связи между содержанием ртути и величиной $\delta^{15}\text{N}$ как для всех жителей Вологодской области ($r_s=0,496$), так и для городского населения ($r_s=0,392$) и сельского населения востока ($r_s=0,617$) и запада ($r_s=0,512$) (рисунок 21).

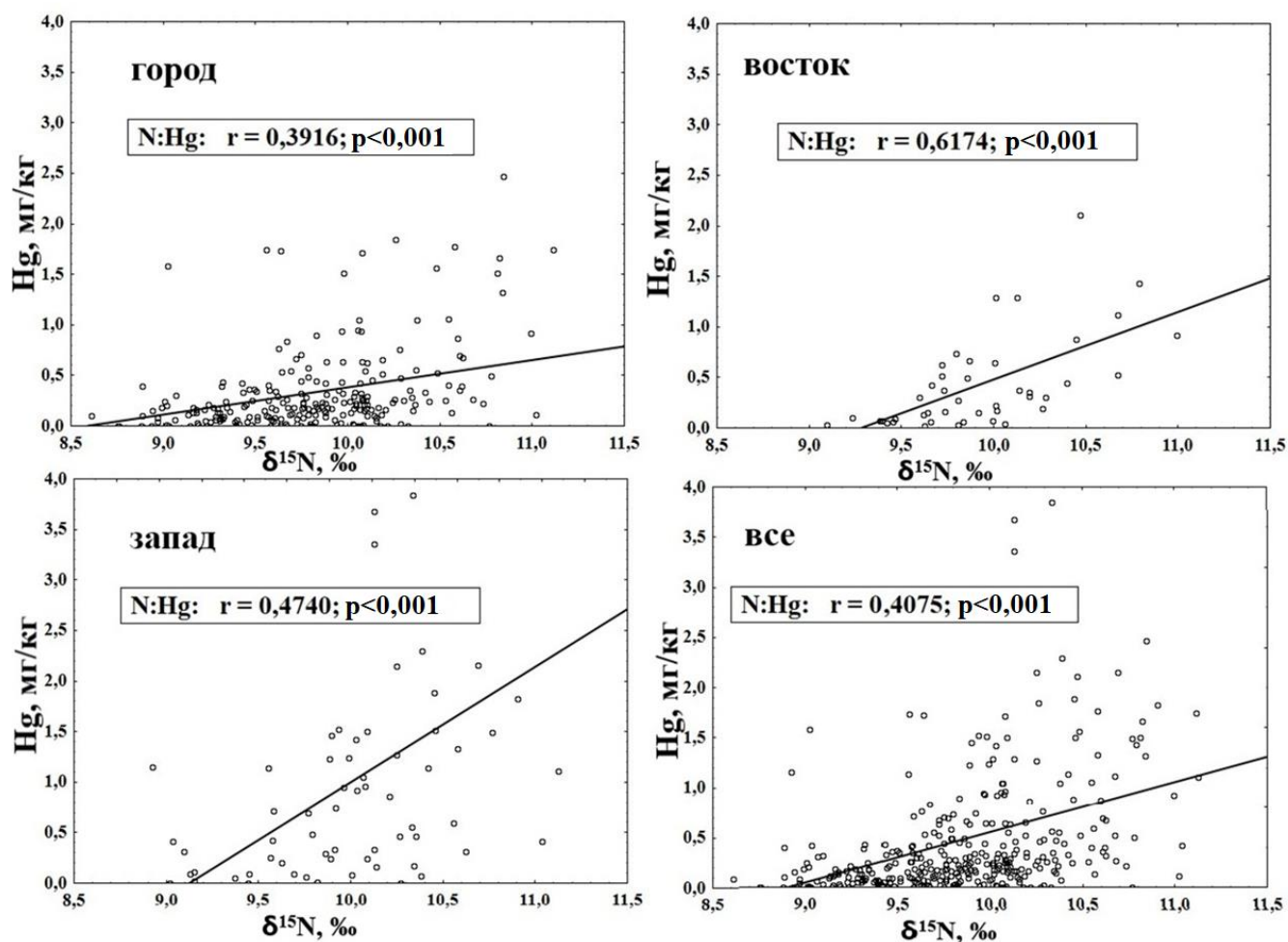


Рисунок 21 – Корреляционная связь между содержанием ртути (мг/кг) и значением $\delta^{15}\text{N}$ (‰) в волосах

Корреляционная связь между содержанием ртути и значением $\delta^{13}\text{C}$ в волосах не установлена как в целом для выборки, так и для городского и сельского населения восточных и западных районов (рисунок 22).

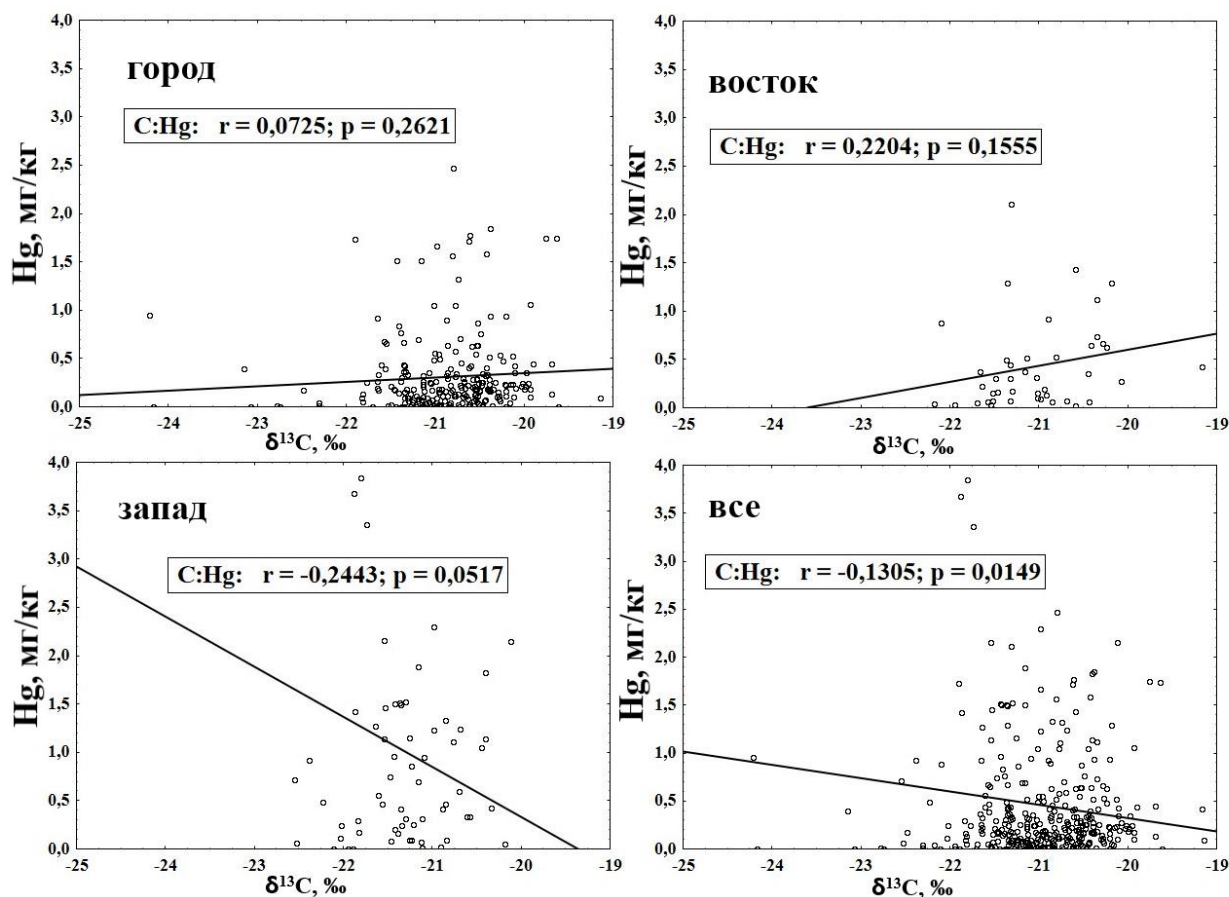


Рисунок 22 – Корреляционная связь между содержанием ртути (мг/кг) и значением $\delta^{13}C$ (‰) в волосах

При проведении корреляционного анализа между величинами $\delta^{15}N$ и $\delta^{13}C$ в волосах установлена статистически значимо положительная связь для общей выборки ($r_s = 0,16; p < 0,001$) и городского населения области ($r_s = 0,422; p < 0,001$). У жителей восточных и западных районов области аналогичных корреляций не выявлено (рисунок 23).

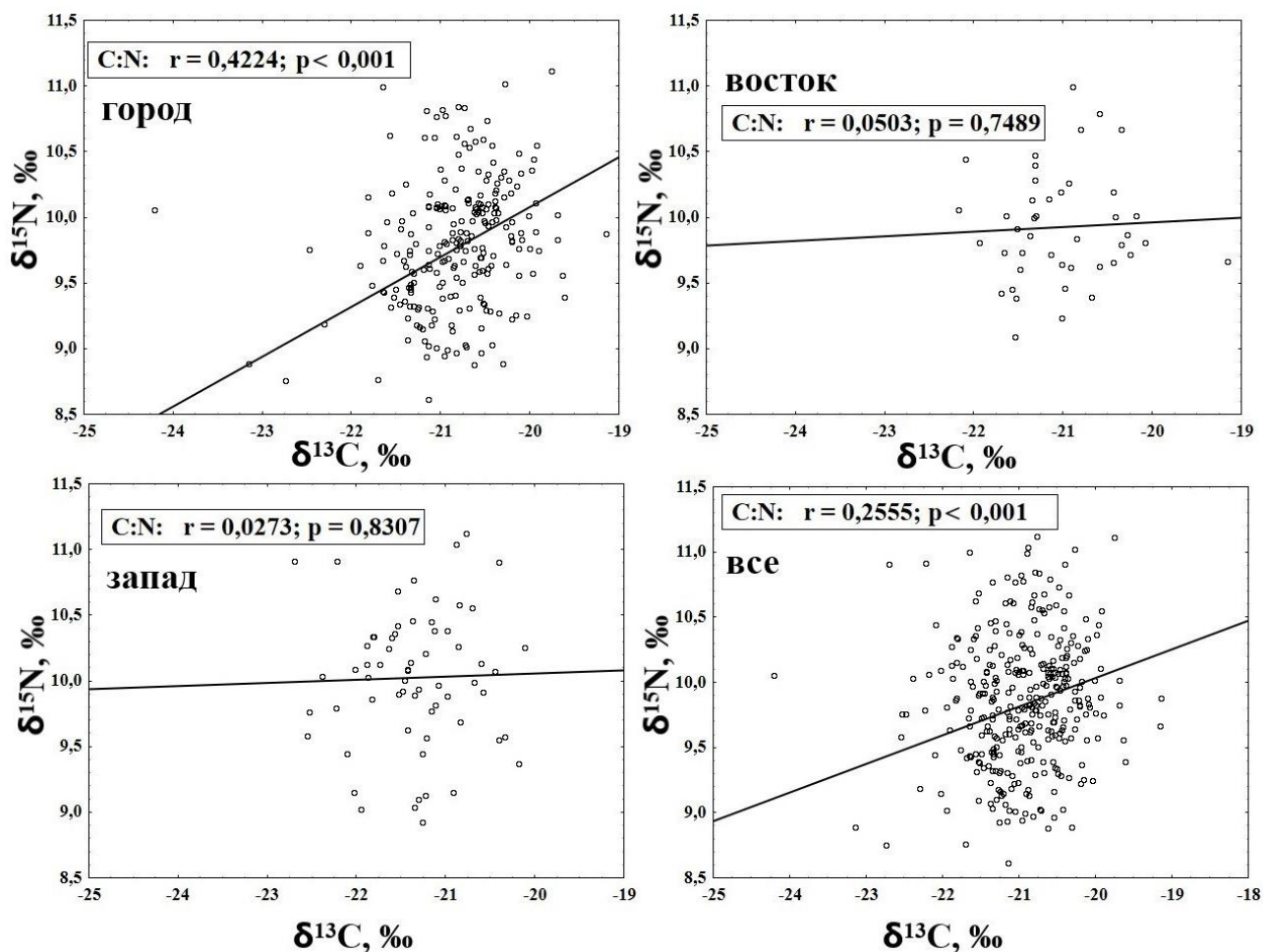


Рисунок 23 – Корреляционная связь между значением $\delta^{15}\text{N}$ (‰) и значением $\delta^{13}\text{C}$ (‰) в волосах

Повышенное содержание ртути в волосах соответствует повышенному содержанию тяжелого изотопа азота (^{15}N) и легкому изотопу углерода. Для западных районов области отмечены самые высокие значения ртути и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах, при этом показатель $\delta^{13}\text{C}$ самый низкий по сравнению с восточными районами и промышленно-административным центром (рисунок 24).

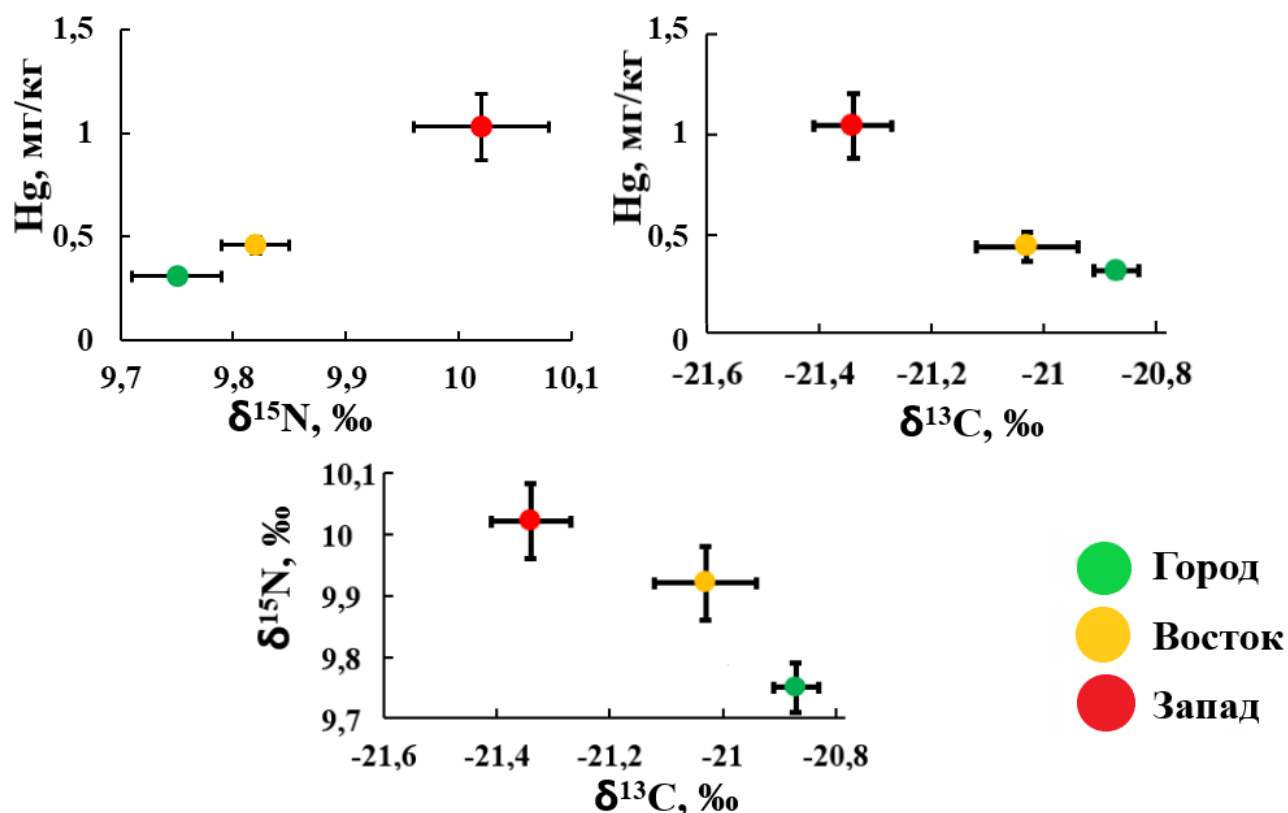


Рисунок 24 – Взаимосвязь между содержанием ртути (мг/кг), $\delta^{15}\text{N}$ (‰), $\delta^{13}\text{C}$ (‰) в волосах населения разных районов Вологодской области (планки погрешностей показывают ошибки среднего)

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 24).

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

Установлены статистически значимые различия по содержанию ртути в волосах между мужчинами и женщинами. В целом, по выборке, содержание ртути в волосах статистически значимо выше у женщин ($0,47 \pm 0,04$ мг/кг), по сравнению с мужчинами ($0,44 \pm 0,09$ мг/кг) (таблица 12, рисунок 25).

Таблица 12 – Содержание ртути (мг/кг) и соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах мужчин и женщин

Пол		Mean	Med	SD	SE	Min-Max	Различия
Вологодская область							
Женщины (n=262)	Hg	0,47	0,25	0,65	0,04	0,001-6,80	b
	$\delta^{15}\text{N}$	9,90	9,91	0,53	0,03	7,77-11,12	b
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,94	-20,90	0,61	0,04	(-23,08)-(-19,16)	b
Мужчины (n=84)	Hg	0,44	0,11	0,86	0,09	0,001-5,02	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,57	9,66	0,62	0,07	6,98-10,91	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,08	-21,01	0,80	0,09	(-24,21)-(-19,14)	a
Городское население							
Женщины (n=176)	Hg	0,36	0,22	0,42	0,03	0,001-2,47	b
	$\delta^{15}\text{N}$	9,86	9,88	0,54	0,04	7,77-11,11	b
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,78	-20,74	0,55	0,04	(-23,08)-(-19,62)	b
Мужчины (n=64)	Hg	0,19	0,09	0,34	0,04	0,001-1,73	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,45	9,58	0,63	0,08	6,98-10,68	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,11	-21,05	0,84	0,10	(-24,21)-(-19,14)	a
Сельское население восточных районов							
Женщины (n=32)	Hg	0,39	0,29	0,46	0,08	0,03-2,11	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,95	9,85	0,47	0,08	9,09-10,99	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,15	-21,23	0,61	0,11	(-22,18)-(-19,16)	a
Мужчины (n=10)	Hg	0,56	0,64	0,47	0,15	0,03-1,29	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,83	9,83	0,21	0,07	9,46-10,13	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,61	-20,43	0,44	0,14	(-21,35)-(-20,18)	b
Сельское население западных районов							
Женщины (n=54)	Hg	0,86	0,46	1,10	0,15	0,001-6,80	a
	$\delta^{15}\text{N}$	10,01	10,05	0,54	0,07	8,93-11,12	b
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,34	-21,35	0,57	0,08	(-22,70)-(-20,12)	a
Мужчины (n=10)	Hg	1,95	1,04	1,66	0,52	0,42-5,02	a
	$\delta^{15}\text{N}$	10,10	10,08	0,42	0,13	9,55-10,91	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,38	-21,38	0,71	0,22	(-22,39)-(-20,33)	a

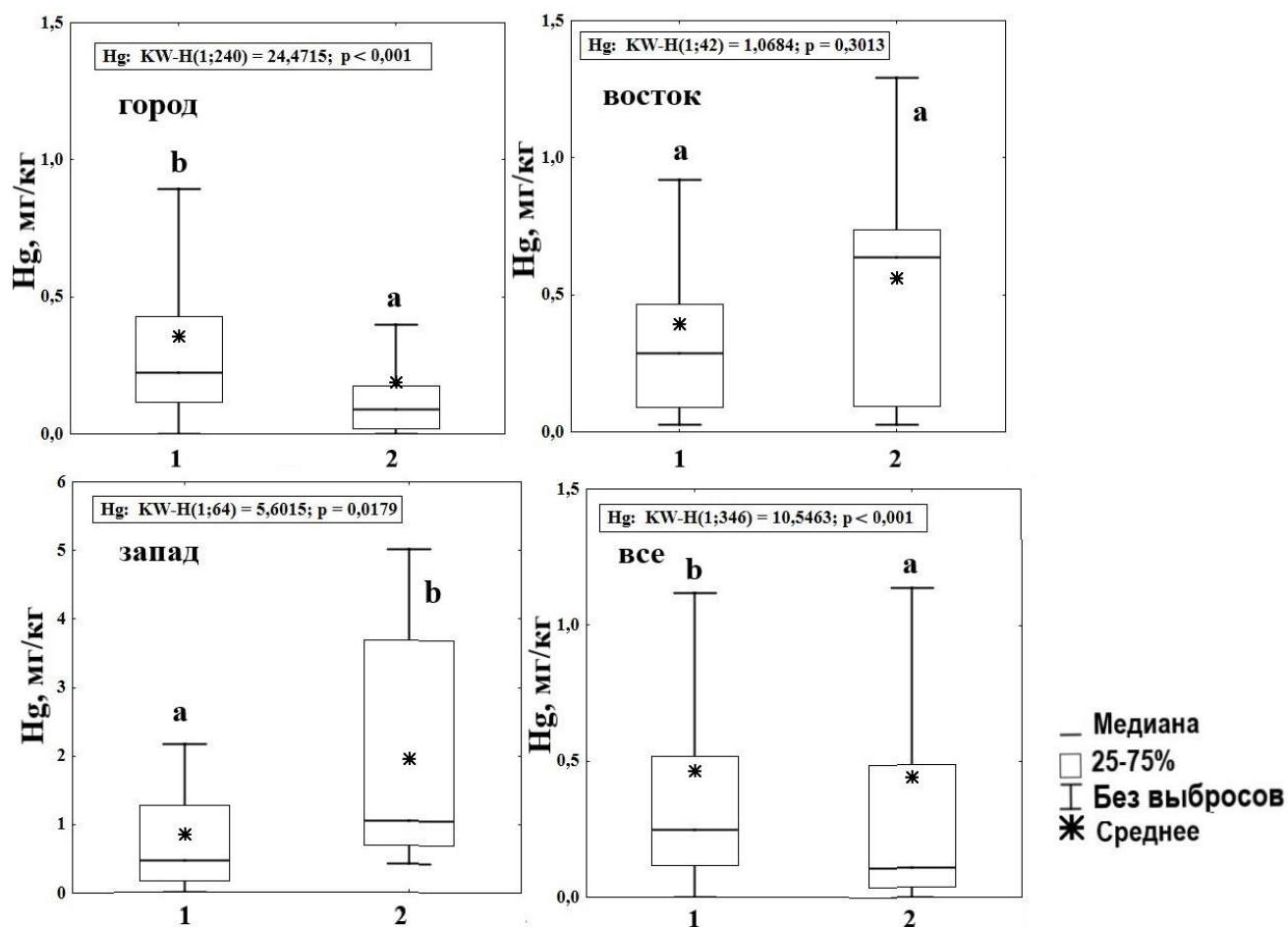


Рисунок 25 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах женщин (1) и мужчин (2)

Значения величины $\delta^{15}\text{N}$ в волосах женщин статистически выше, чем у мужчин – $9,9 \pm 0,03\text{‰}$ и $9,57 \pm 0,07\text{‰}$, соответственно (таблица 12, рисунок 26).

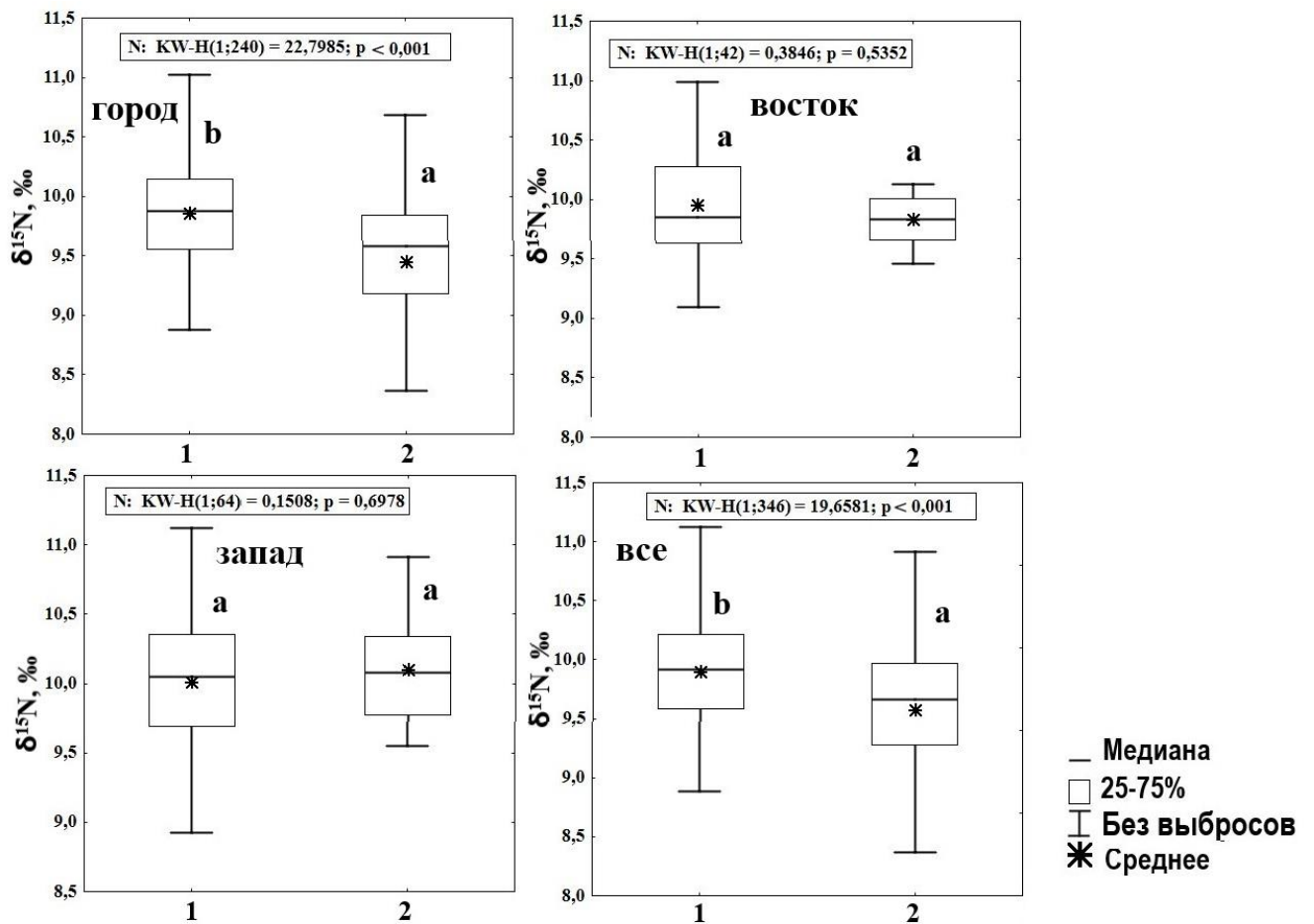


Рисунок 26 – Соотношение стабильных изотопов азота (‰) в волосах женщин (1) и мужчин (2)

При этом межполовых отличий в изотопном составе углерода не выявлено: у женщин $\delta^{13}\text{C} = -20,94 \pm 0,04\text{‰}$, у мужчин $\delta^{13}\text{C} = -21,08 \pm 0,09\text{‰}$ (таблица 12, рисунок 27).

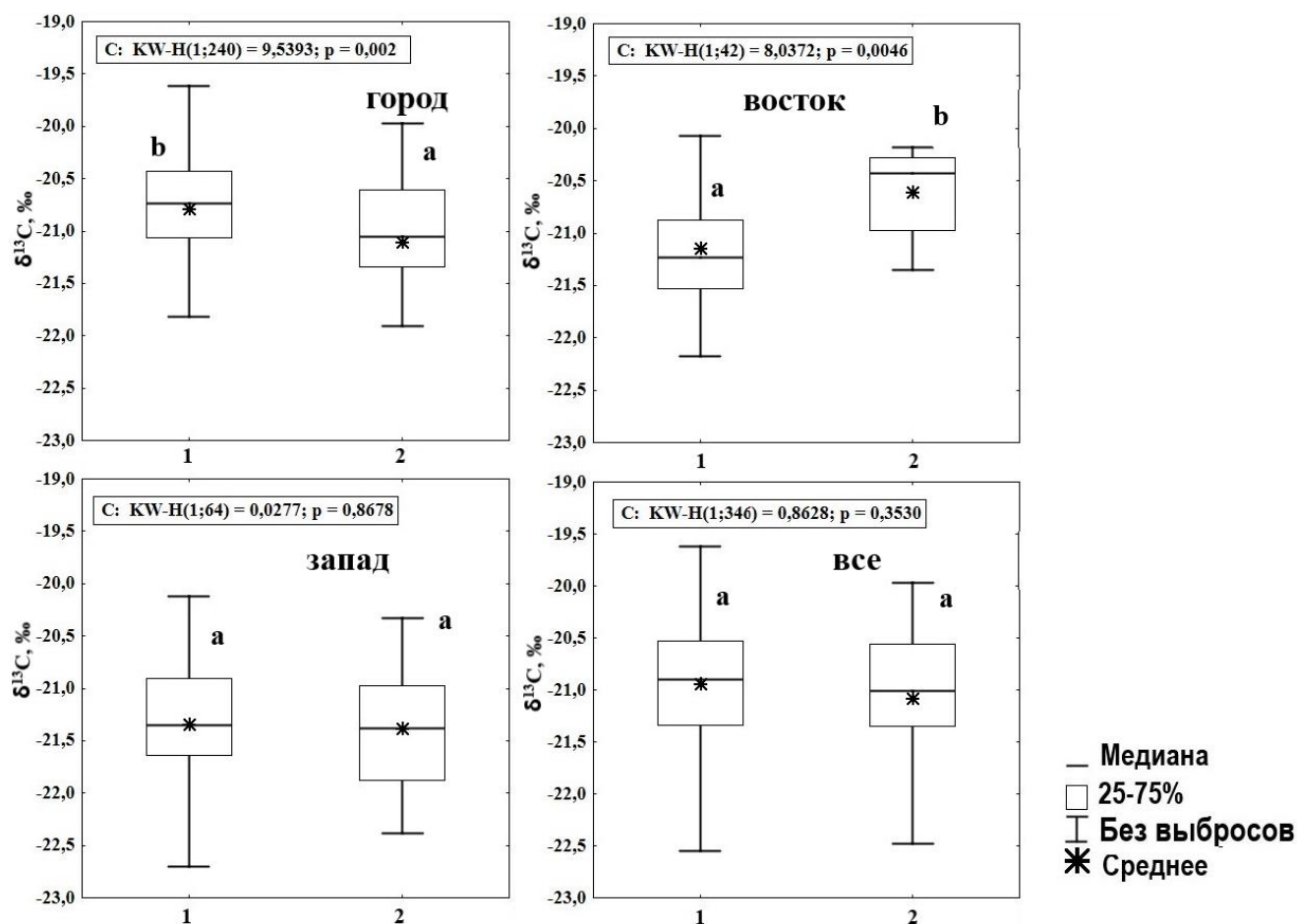


Рисунок 27 – Соотношение стабильных изотопов углерода (‰) в волосах женщин (1) и мужчин (2)

По всем изучаемым параметрам (Hg, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$) установлены статистически значимые различия между мужчинами и женщинами, проживающих в городе (таблица 12, рисунок 25-27). Содержание ртути в волосах статистически значимо выше почти в два раза у женщин ($0,36 \pm 0,03$ мг/кг), по сравнению с мужчинами ($0,19 \pm 0,04$ мг/кг). Аналогично, значения $\delta^{15}\text{N}$ статистически значимо выше у женщин (9,86 ‰), чем у мужчин $\delta^{15}\text{N}$ (9,45 ‰). Величины $\delta^{13}\text{C}$ в волосах женщин также статистически значимо выше (-20,78 ‰) по сравнению с $\delta^{13}\text{C}$ в волосах мужчин (-21,11 ‰).

Статистически значимых различий между содержанием ртути в волосах женщин ($0,39 \pm 0,08$ мг/кг) и мужчин ($0,56 \pm 0,15$ мг/кг) восточных районов области не установлено (таблица 12, рисунок 25). Также не отмечены различия при сравнении значения $\delta^{15}\text{N}$ между женщинами (9,95 ‰) и мужчинами (9,83 ‰).

(таблица 12, рисунок 26). При этом, у женщин соотношение стабильных изотопов углерода ($-21,15\text{ ‰}$) статистически значимо ниже, чем у мужчин ($-20,61\text{ ‰}$) (таблица 12, рисунок 27).

Содержание ртути в волосах статистически значимо выше у мужчин ($1,95 \pm 0,52\text{ мг/кг}$) по сравнению с женщинами ($0,857 \pm 0,15\text{ мг/кг}$), проживающих на западе области (таблица 12, рисунок 25). Значения $\delta^{15}\text{N}$ в волосах женщин ($10,01\text{ ‰}$) и мужчин ($10,1\text{ ‰}$) не отличаются (таблица 12, рисунок 26). Среднее значение $\delta^{13}\text{C}$ в волосах женщин ($-21,34\text{ ‰}$) сопоставимо со значением $\delta^{13}\text{C}$ в волосах мужчин ($-21,38\text{ ‰}$) (таблица 12, рисунок 27).

Установлена статистически значимо положительная корреляционная связь между содержанием ртути и возрастом для общей выборки ($r_s = 0,367$; $p < 0,001$) и городского населения ($r_s = 0,301$; $p < 0,001$). Для сельского населения восточных и западных районов области такой зависимости не установлено (рисунок 28).

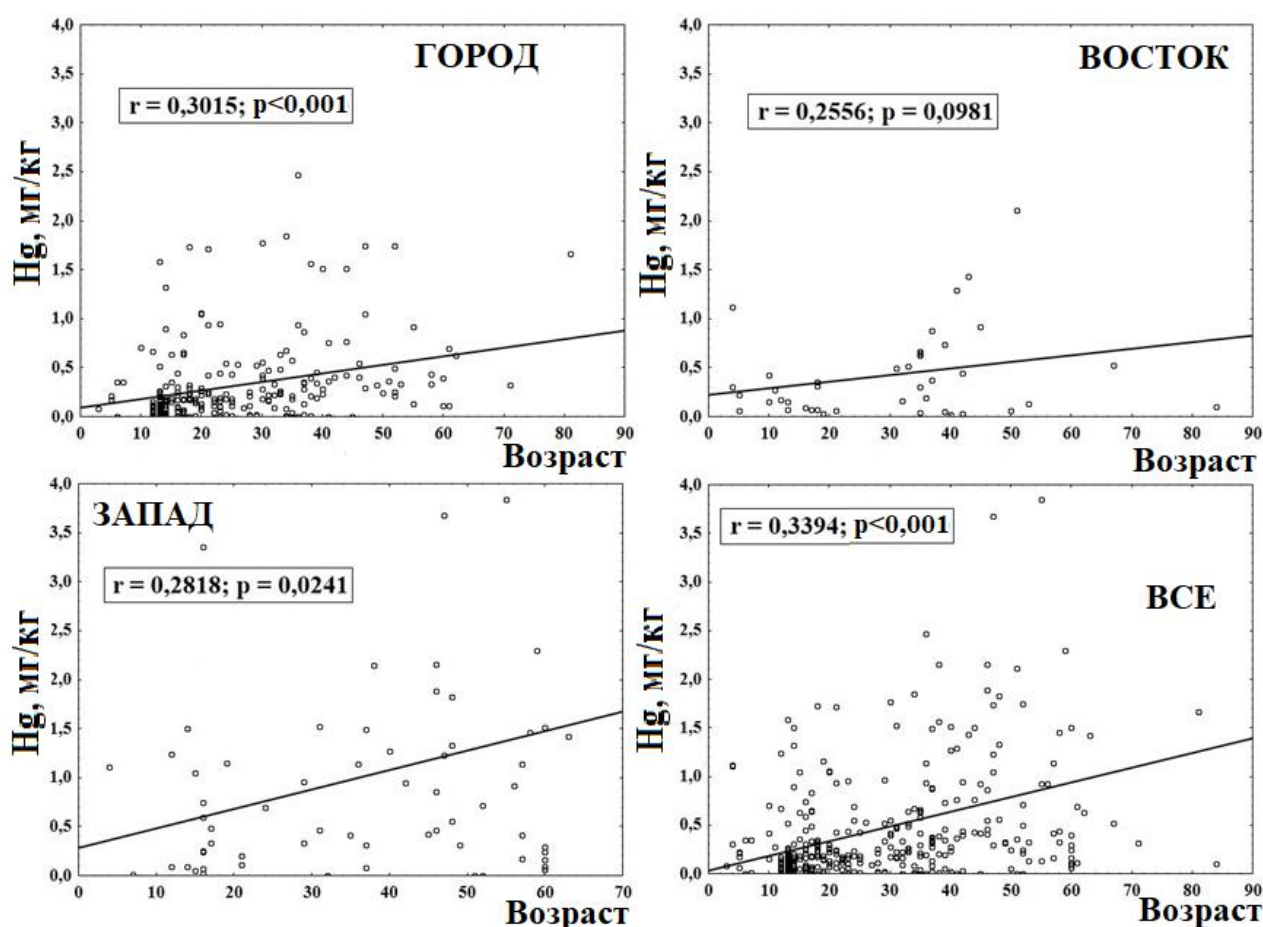


Рисунок 28 – Корреляционная связь между содержанием ртути (мг/кг) в волосах и возрастом

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 ($r_s = 0,301$; $p < 0,001$). Для сельского восточного и западного населения региона не установлено статистически значимой корреляции между возрастом и величиной $\delta^{15}\text{N}$ (рисунок 29).

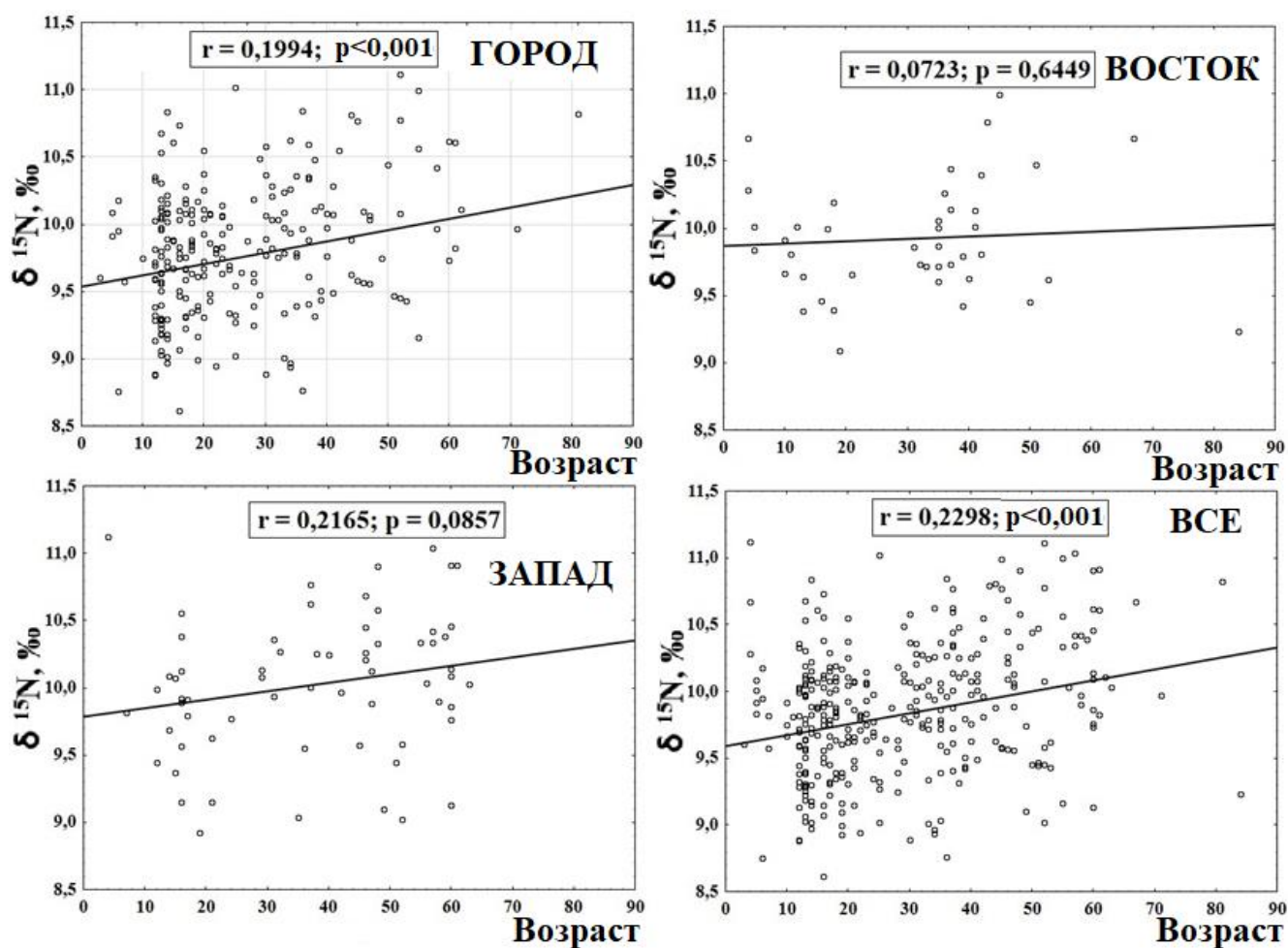


Рисунок 29 – Корреляционный анализ значения $\delta^{15}\text{N}$ (‰) в волосах и возраста участников исследования

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 (рисунок 30).

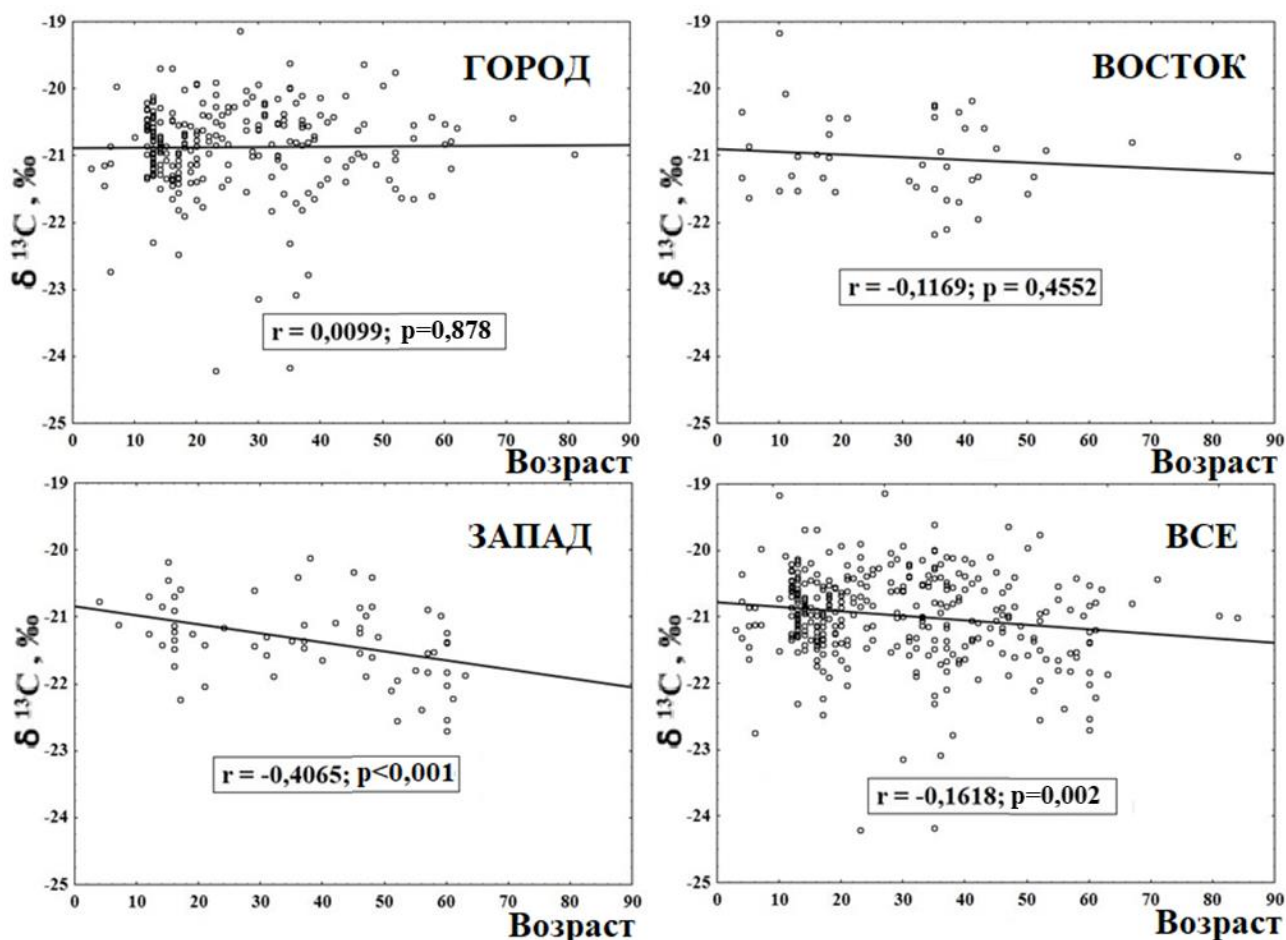


Рисунок 30 – Корреляционный анализ значения $\delta^{13}\text{C}$ (‰) в волосах и возраста участников исследования

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

При оценке частоты потребления рыбы в рационе питания, отмечено, что в целом по выборке, установлены статистически значимые различия по содержанию ртути в волосах людей в зависимости от частоты потребления рыбы. Высокие концентрации ртути в волосах отмечены у людей, которые питаются рыбой несколько раз в неделю ($1,02 \pm 0,24$ мг/кг), ниже значения в волосах людей, которые питаются рыбой 1-2 раза в неделю ($0,54 \pm 0,07$ мг/кг) и 1-2 раза в месяц ($0,45 \pm 0,05$ мг/кг), статистически значимо минимальные значения отмечены в волосах людей, которые питаются рыбой реже одного раза в месяц ($0,17 \pm 0,03$ мг/кг) (таблица 13, рисунок 31).

Таблица 13 – Содержание ртути (мг/кг) и соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах населения в зависимости от частоты потребляемой рыбы в рационе питания

Частота питания рыбных продуктов		Mean	Median	SD	SE	Min-Max	Различия
Вологодская область							
несколько раз в неделю (n=33)	Hg	1,02	0,51	1,40	0,24	0,001-6,80	c
	$\delta^{15}\text{N}$	10,09	10,03	0,53	0,09	9,15-10,99	c
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,18	-21,14	0,53	0,09	(-22,70)-(-20,39)	a
1-2 раза в неделю (n=80)	Hg	0,54	0,29	0,66	0,07	0,001-3,36	b
	$\delta^{15}\text{N}$	9,94	10,01	0,49	0,05	8,88-11,02	bc
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,00	-20,96	0,60	0,07	(-23,15)-(-19,62)	ab
1-2 раза в месяц (n=154)	Hg	0,45	0,25	0,59	0,05	0,001-5,02	ab
	$\delta^{15}\text{N}$	9,87	9,88	0,47	0,04	8,44-11,12	b
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,89	-20,81	0,68	0,05	(-24,21)-(-19,14)	b
редко (n=76)	Hg	0,17	0,10	0,24	0,03	0,001-1,24	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,56	9,61	0,61	0,07	7,08-11,04	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,00	-20,92	0,71	0,08	(-24,17)-(-19,93)	b
Городское население							
несколько раз в неделю (n=19)	Hg	0,51	0,27	0,56	0,13	0,001-1,72	b
	$\delta^{15}\text{N}$	9,97	9,79	0,56	0,13	9,15-10,99	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,97	-20,98	0,39	0,09	(-21,65)-(-20,39)	a
1-2 раза в неделю (n=46)	Hg	0,40	0,25	0,48	0,07	0,001-2,47	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,90	9,89	0,55	0,08	8,88-11,02	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,90	-20,83	0,62	0,09	(-23,15)-(-19,62)	a
1-2 раза в месяц (n=109)	Hg	0,35	0,21	0,42	0,04	0,001-1,77	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,83	9,88	0,45	0,04	8,44-11,11	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,74	-20,71	0,61	0,06	(-24,21)-(-19,14)	a
редко (n=62)	Hg	0,15	0,10	0,18	0,02	0,001-0,89	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,51	9,61	0,62	0,08	7,08-10,59	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,99	-20,88	0,76	0,10	(-24,17)-(-19,93)	a
Сельское население восточных районов							
несколько раз в неделю (n=4)	Hg	0,44	0,41	0,38	0,19	0,03-0,92	a
	$\delta^{15}\text{N}$	10,18	10,00	0,58	0,29	9,72-10,99	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,25	-21,08	0,47	0,24	(-21,94)-(-20,89)	a
1-2 раза в неделю (n=20)	Hg	0,48	0,21	0,58	0,13	0,03-2,11	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,98	10,01	0,39	0,09	9,23-10,79	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,05	-21,08	0,42	0,09	(-21,64)-(-20,18)	a
1-2 раза в месяц (n=13)	Hg	0,45	0,42	0,33	0,09	0,04-1,12	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,93	9,80	0,41	0,11	9,39-10,67	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,84	-20,68	0,87	0,24	(-22,18)-(-19,16)	a
редко (n=6)	Hg	0,18	0,09	0,24	0,10	0,03-0,66	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,58	9,54	0,33	0,14	9,09-10,02	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,21	-21,42	0,54	0,22	(-21,69)-(-20,28)	a
Сельское население западных районов							
несколько раз в неделю (n=10)	Hg	2,24	1,48	2,00	0,63	0,01-6,80	b
	$\delta^{15}\text{N}$	10,28	10,23	0,40	0,13	9,82-10,91	ab
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,57	-21,53	0,59	0,19	(-22,70)-(-20,40)	a
1-2 раза в неделю (n=14)	Hg	1,08	0,99	0,96	0,26	0,001-3,36	b
	$\delta^{15}\text{N}$	10,00	10,11	0,43	0,12	8,93-10,69	b
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,25	-21,34	0,68	0,18	(-22,39)-(-20,12)	ab

Продолжение таблицы 13

Частота питания рыбных продуктов		Mean	Median	SD	SE	Min-Max	Различия
1-2 раза в месяц (n=32)	Hg	0,78	0,44	0,97	0,17	0,001-5,02	ab
	$\delta^{15}\text{N}$	9,99	9,92	0,55	0,10	9,02-11,12	ab
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,42	-21,35	0,55	0,10	(-22,55)-(-20,33)	ab
редко (n=8)	Hg	0,39	0,17	0,46	0,16	0,02-1,24	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,86	9,76	0,62	0,22	9,15-11,04	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,92	-21,00	0,35	0,12	(-21,26)-(-20,18)	b

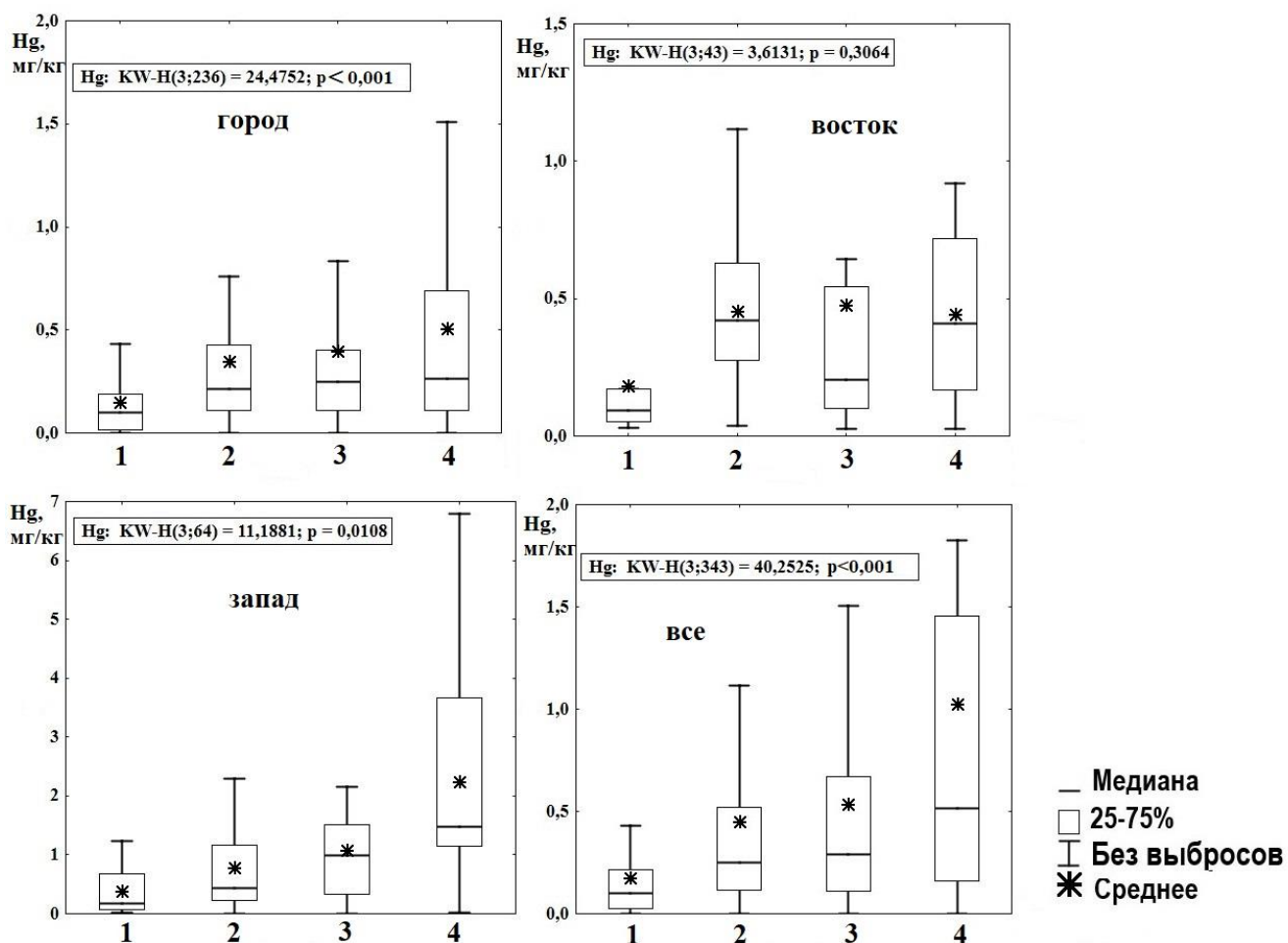


Рисунок 31 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах исследуемой выборки по частоте питания рыбных продуктов (1- несколько раз в неделю, 2- 1-2 раза в неделю, 3- 1-2 раза в месяц, 4- редко)

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 $9,94 \pm 0,05\text{‰}$, у тех, кто питается рыбой 1-2 раза в месяц – $9,87 \pm 0,04\text{‰}$. Минимальные значения отмечены в волосах людей, которые питаются рыбой реже одного раза в месяц – $\delta^{15}\text{N} = 9,56 \pm 0,07\text{‰}$ (таблица 13, рисунок 32).

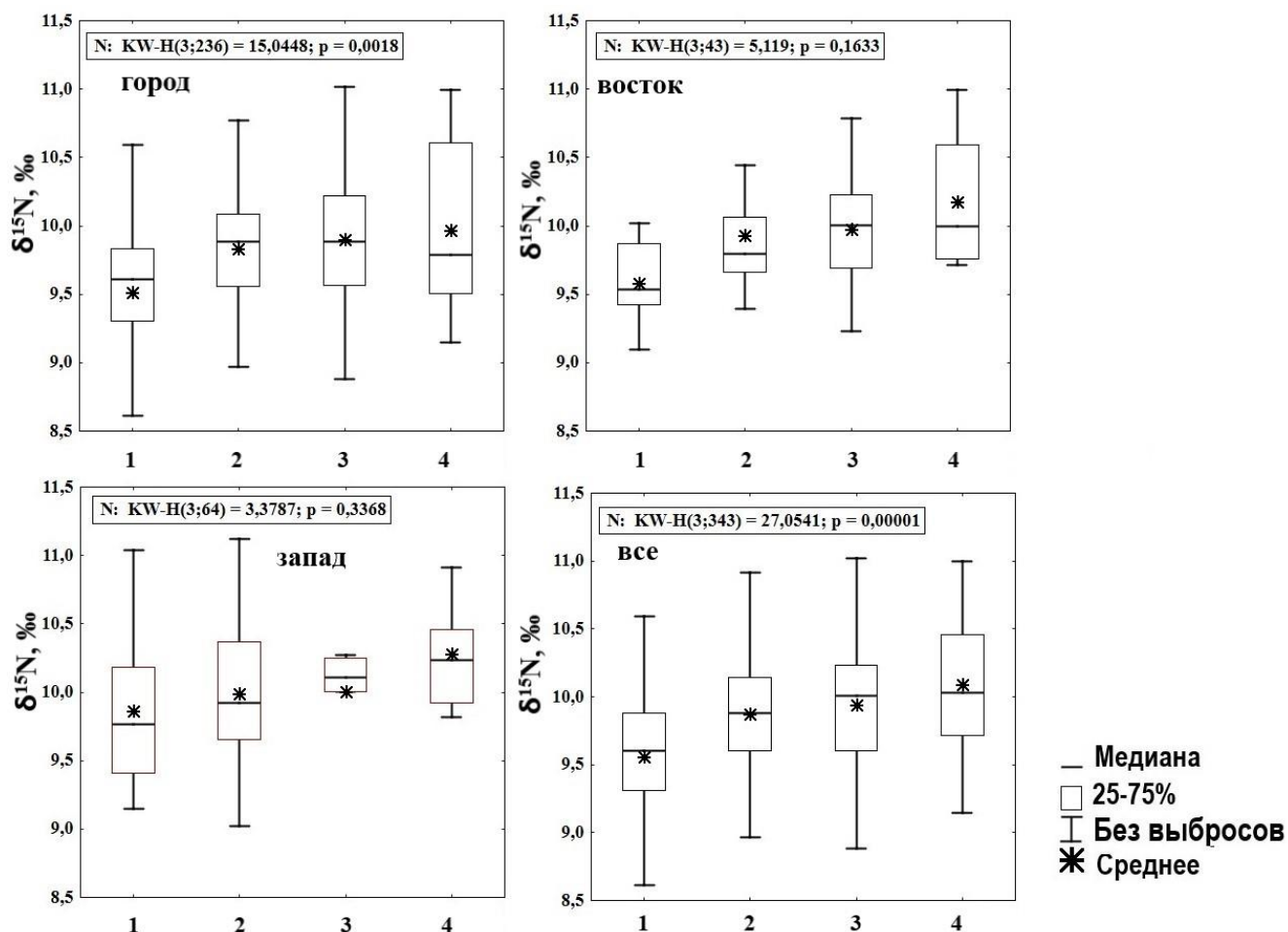


Рисунок 32 – Соотношение стабильных изотопов азота (‰) в волосах исследуемой выборки по частоте питания рыбных продуктов (1- несколько раз в неделю, 2- 1-2 раза в неделю, 3- 1-2 раза в месяц, 4- редко)

В волосах людей, употребляющих рыбу в пищу несколько раз в неделю ($-21,18 \pm 0,09\text{‰}$) изотопный состав углерода легче по сравнению людьми питающихся 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 $-21,0 \pm 0,07\text{‰}$, $-20,89 \pm 0,05\text{‰}$ и $-21,00 \pm 0,08\text{‰}$, соответственно (таблица 13, рисунок 33).

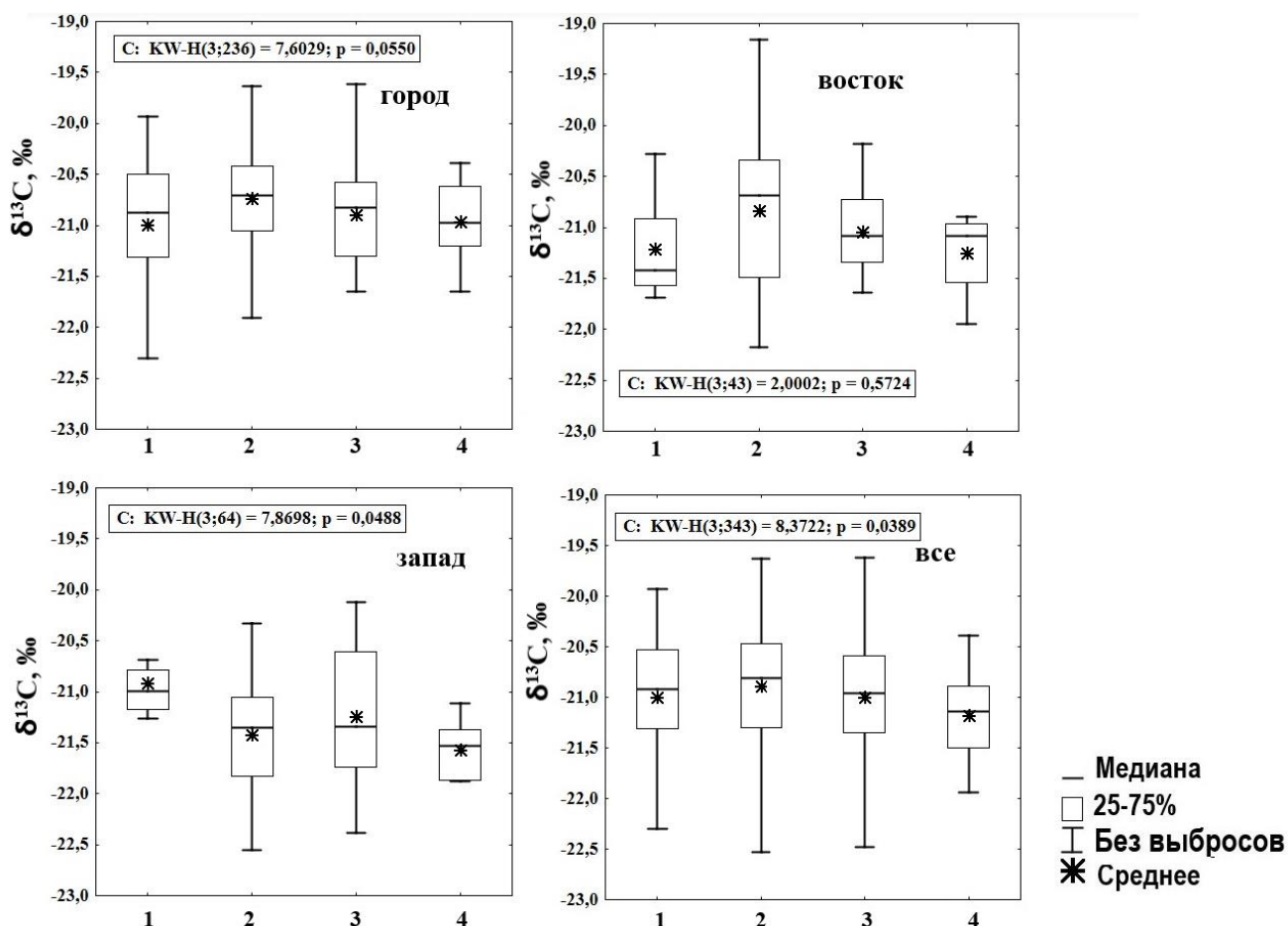


Рисунок 33 – Соотношение стабильных изотопов углерода (‰) в волосах исследуемой выборки по частоте питания рыбных продуктов (1- несколько раз в неделю, 2- 1-2 раза в неделю, 3- 1-2 раза в месяц, 4- редко)

При оценке рациона питания у городских жителей Вологодской области установлены статистически значимые различия по содержанию ртути в волосах людей городской местности в зависимости от частоты потребления рыбы (таблица 13). Высокое содержание ртути в волосах отмечено у людей, которые питаются рыбой несколько раз в неделю ($0,51 \pm 0,13$ мг/кг), ниже в волосах людей, которые питаются рыбой 1-2 раза в неделю ($0,4 \pm 0,07$ мг/кг) и 1-2 раза в месяц ($0,35 \pm 0,04$ мг/кг), значения ртути статистически значимо ниже в волосах людей, которые питаются рыбой реже одного раза в месяц ($0,15 \pm 0,02$ мг/кг) (таблица 13, рисунок 31). Значения $\delta^{15}\text{N}$ в волосах людей с частотой питания рыбы несколько раз в неделю, 1-2 раза в неделю и 1-2 раза в месяц составляют – 9,97 ‰, 9,9 ‰ и 9,83 ‰ соответственно, значения $\delta^{15}\text{N}$ в волосах статистически значимо ниже у людей,

которые питаются рыбой реже одного раза в месяц (9,51 ‰) (таблица 13, рисунок 32). По соотношению стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в волосах людей с разной частотой питания статистически значимых различий не установлено. Значения $\delta^{13}\text{C}$ в волосах людей с потреблением рыбы несколько раз в неделю составляет (-20,97 ‰), значения $\delta^{13}\text{C}$ в волосах людей, которые питаются рыбой 1-2 раза в неделю, 1-2 раза в месяц и менее одного раза в месяц составляют (-20,9 ‰), (-20,74 ‰) и (-20,99 ‰), соответственно (таблица 13, рисунок 33).

По содержанию ртути, значениям $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в волосах людей из восточных районов области в зависимости от частоты потребления рыбы статистически значимых различий не установлено (таблица 13). Содержание ртути в волосах людей, которые питаются рыбой несколько раз в неделю составляет – $0,44 \pm 0,19$ мг/кг, значения ртути в волосах людей, которые питаются рыбой 1-2 раза в неделю – $0,48 \pm 0,13$ мг/кг, 1-2 раза в месяц – $0,45 \pm 0,09$ мг/кг, минимальные значения отмечены в волосах людей, которые питаются рыбой реже одного раза в месяц ($0,18 \pm 0,1$ мг/кг) (таблица 13, рисунок 31). Высокие значения $\delta^{15}\text{N}$ отмечены у людей, которые питаются рыбой несколько раз в неделю (10,18 ‰), значения $\delta^{15}\text{N}$ в волосах людей с частотой питания рыбы 1-2 раза в неделю, 1-2 раза в месяц и реже одного раза в месяц составляют – 9,98 ‰, 9,93 ‰ и 9,58 ‰ соответственно (таблица 13, рисунок 32). Значения $\delta^{13}\text{C}$ в волосах людей с потреблением рыбы несколько раз в неделю составляет (-21,25 ‰), значения $\delta^{13}\text{C}$ в волосах людей, которые питаются рыбой 1-2 раза в неделю, 1-2 раза в месяц и менее одного раза в месяц составляют (-21,05 ‰), (-20,84 ‰) и (-21,21 ‰), соответственно (таблица 13, рисунок 33).

По уровню ртути в волосах населения западных районов области в зависимости от частоты потребления рыбы установлены статистически значимые различия (таблица 13). Содержание ртути в волосах статистически значимо выше у людей, которые питаются рыбой несколько раз в неделю ($2,24 \pm 0,63$ мг/кг), значения ртути в волосах людей, которые питаются рыбой 1-2 раза в неделю – $1,08 \pm 0,26$ мг/кг, 1-2 раза в месяц – $0,78 \pm 0,17$ мг/кг, статистически значимо ниже значения ртути отмечены в волосах людей, которые питаются рыбой реже одного раза в

месяц ($0,39 \pm 0,16$ мг/кг) (таблица 13, рисунок 31). Статистически значимых различий по соотношению стабильных изотопов азота ($\delta^{15}\text{N}$) в волосах людей в зависимости от частоты потребления рыбных продуктов не установлено. При этом, высокие значения $\delta^{15}\text{N}$ отмечены в волосах людей, которые питаются рыбой несколько раз в неделю ($10,28 \text{ ‰}$), ниже значения $\delta^{15}\text{N}$ отмечены в волосах людей с потреблением рыбы в пищу 1-2 раза в неделю ($10,00 \text{ ‰}$) и 1-2 раза в месяц ($9,99 \text{ ‰}$), низкие значения $\delta^{15}\text{N}$ отмечены в волосах людей, питающиеся реже одного раза в месяц ($9,86 \text{ ‰}$) (таблица 13, рисунок 32). Значения $\delta^{13}\text{C}$ в волосах людей, которые питаются рыбой несколько раз в неделю, 1-2 раза в неделю и 1-2 раза в месяц составляют ($-21,57 \text{ ‰}$), ($-21,25 \text{ ‰}$) и ($-21,42 \text{ ‰}$) соответственно. Значения соотношения стабильных изотопов углерода в волосах статистически значимо выше у людей с потреблением рыбы менее одного раза в месяц ($-20,92 \text{ ‰}$) (таблица 13, рисунок 33).

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 у 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) (таблица 14, рисунок 34).

Таблица 14 – Содержание ртути (мг/кг) и соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах жителей горожан с разным типом предпочтительной пищи в рационе питания

Предпочтительная пища в рационе питания		Mean	Median	SD	SE	Min-Max	Различия
растительная пища (n=19)	Hg	0,06	0,01	0,11	0,02	0,001-0,43	a
	$\delta^{15}\text{N}$	8,70	8,94	0,79	0,18	6,98-9,66	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,72	-21,44	0,97	0,22	(-24,17) -(-20,03)	a
мясо (n=46)	Hg	0,28	0,18	0,33	0,05	0,001-1,77	b
	$\delta^{15}\text{N}$	9,86	9,82	0,40	0,06	8,97-10,58	b
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,79	-20,71	0,47	0,07	(-21,82) -(-19,69)	b

Продолжение таблицы 14

Предпочтительная пища в рационе питания		Mean	Median	SD	SE	Min-Max	Различия
рыба (n=26)	Hg	0,62	0,41	0,59	0,12	0,01-2,47	c
	$\delta^{15}\text{N}$	9,94	9,77	0,50	0,10	8,88-10,84	b
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,10	-20,83	0,92	0,18	(-24,21) -(-20,24)	b

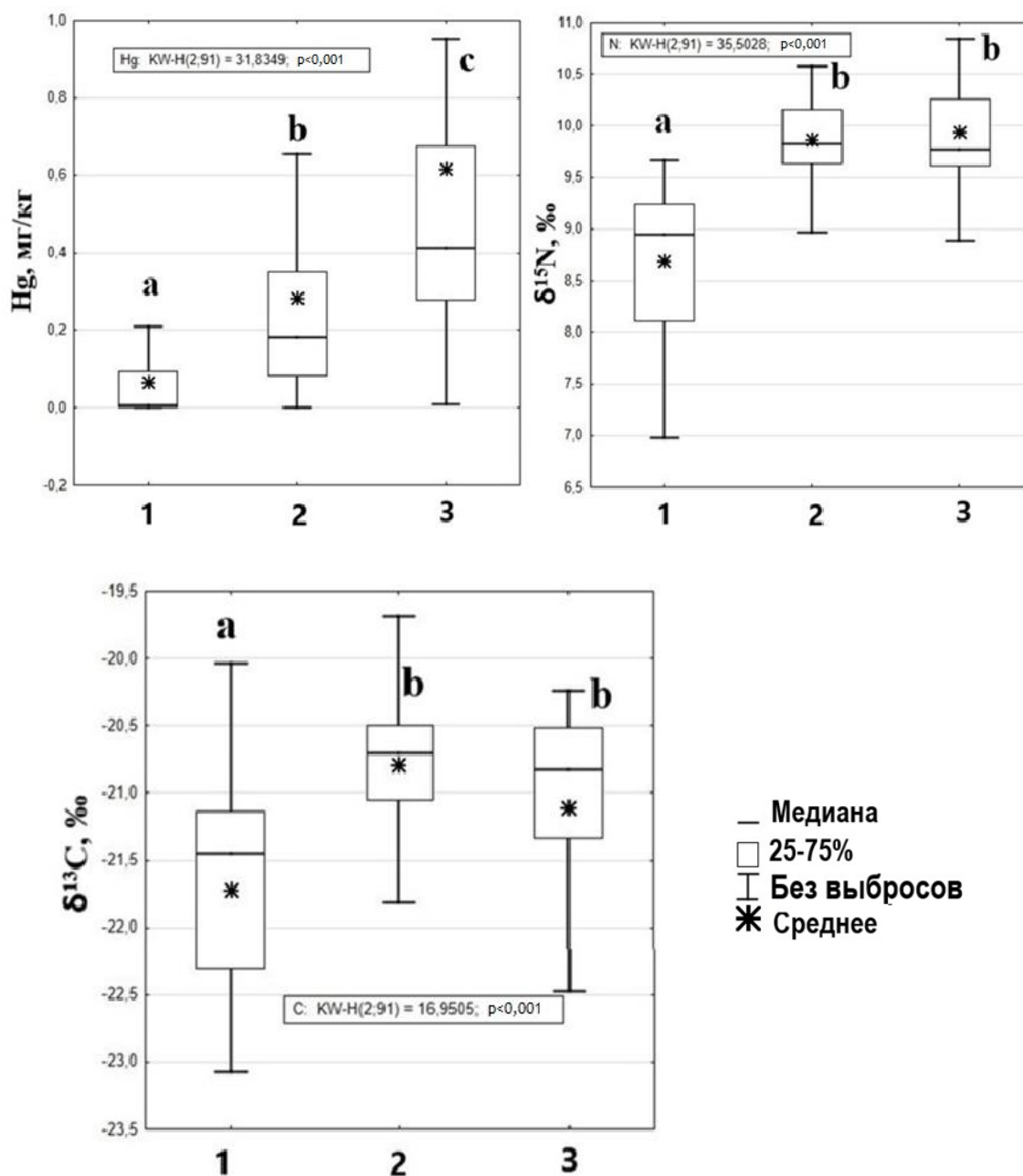


Рисунок 34 – Содержание ртути (мг/кг) и соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах жителей Вологодской области с разным типом предпочтительной пищи в рационе питания (1– растительный тип питания, 2 – мясной тип питания; 3 – рыбный тип питания).

Изотопный состав азота и углерода в волосах людей с растительным типом питания ($\delta^{15}\text{N} = 8,7 \pm 0,18\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = -21,72 \pm 0,22\text{‰}$) статистически значимо содержит меньше тяжелых изотопов по сравнению с мясным ($\delta^{15}\text{N} = 9,86 \pm 0,06\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = -20,79 \pm 0,07\text{‰}$) и рыбным ($\delta^{15}\text{N} = 9,94 \pm 0,1\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = -21,1 \pm 0,18\text{‰}$) типами питания.

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

При оценке связи курения с изучаемыми параметрами, отмечено, что, в целом по выборке, содержание ртути в волосах статистически значимо выше у курящих ($0,59 \pm 0,1$ мг/кг) по сравнению с некурящими людьми ($0,41 \pm 0,04$ мг/кг) людей (таблица 15, рисунок 35).

Таблица 15 – Содержание ртути (мг/кг) и соотношение стабильных изотопов азота и углерода (‰) в волосах курящих и некурящих людей

		Mean	Median	SD	SE	Min-Max	Различия
Вологодская область							
Курят (n=52)	Hg	0,59	0,32	0,73	0,10	0,001-3,67	b
	$\delta^{15}\text{N}$	9,93	9,90	0,38	0,05	8,99-10,69	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,64	-20,58	0,46	0,06	(-21,88)-(-19,62)	b
не курят (n=283)	Hg	0,41	0,19	0,60	0,04	0,001-5,02	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,79	9,83	0,60	0,04	6,98-11,12	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,00	-20,98	0,66	0,04	(-24,21)-(-19,14)	a
Городское население							
Курят (n=35)	Hg	0,37	0,22	0,45	0,08	0,001-1,77	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,90	9,84	0,39	0,07	8,99-10,58	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,56	-20,58	0,40	0,07	(-21,64)-(-19,62)	b
не курят (n=204)	Hg	0,30	0,17	0,40	0,03	0,001-2,47	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,72	9,76	0,62	0,04	6,98-11,11	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,92	-20,86	0,68	0,05	(-24,21)-(-19,14)	a
Сельское население восточных районов							
Курят (n=7)	Hg	0,45	0,63	0,30	0,11	0,03-0,74	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,83	9,80	0,19	0,07	9,62-10,14	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-20,49	-20,42	0,31	0,12	(-21,16)-(-20,24)	b
не курят (n=36)	Hg	0,42	0,25	0,49	0,08	0,03-2,11	a
	$\delta^{15}\text{N}$	9,94	9,89	0,45	0,08	9,09-10,99	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,13	-21,31	0,60	0,10	(-22,18)-(-19,16)	a
Сельское население западных районов							
Курят (n=11)	Hg	1,43	1,04	1,09	0,35	0,31-3,67	a
	$\delta^{15}\text{N}$	10,13	10,19	0,40	0,13	9,55-10,69	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,02	-21,10	0,58	0,18	(-21,88)-(-20,12)	a

Продолжение таблицы 15

		Mean	Median	SD	SE	Min-Max	Различия
не курят (n=45)	Hg	0,92	0,59	1,05	0,16	0,001-5,02	a
	$\delta^{15}\text{N}$	10,00	10,00	0,54	0,08	8,93-11,12	a
	$\delta^{13}\text{C}$	-21,29	-21,30	0,55	0,08	(-22,55)-(-20,18)	a

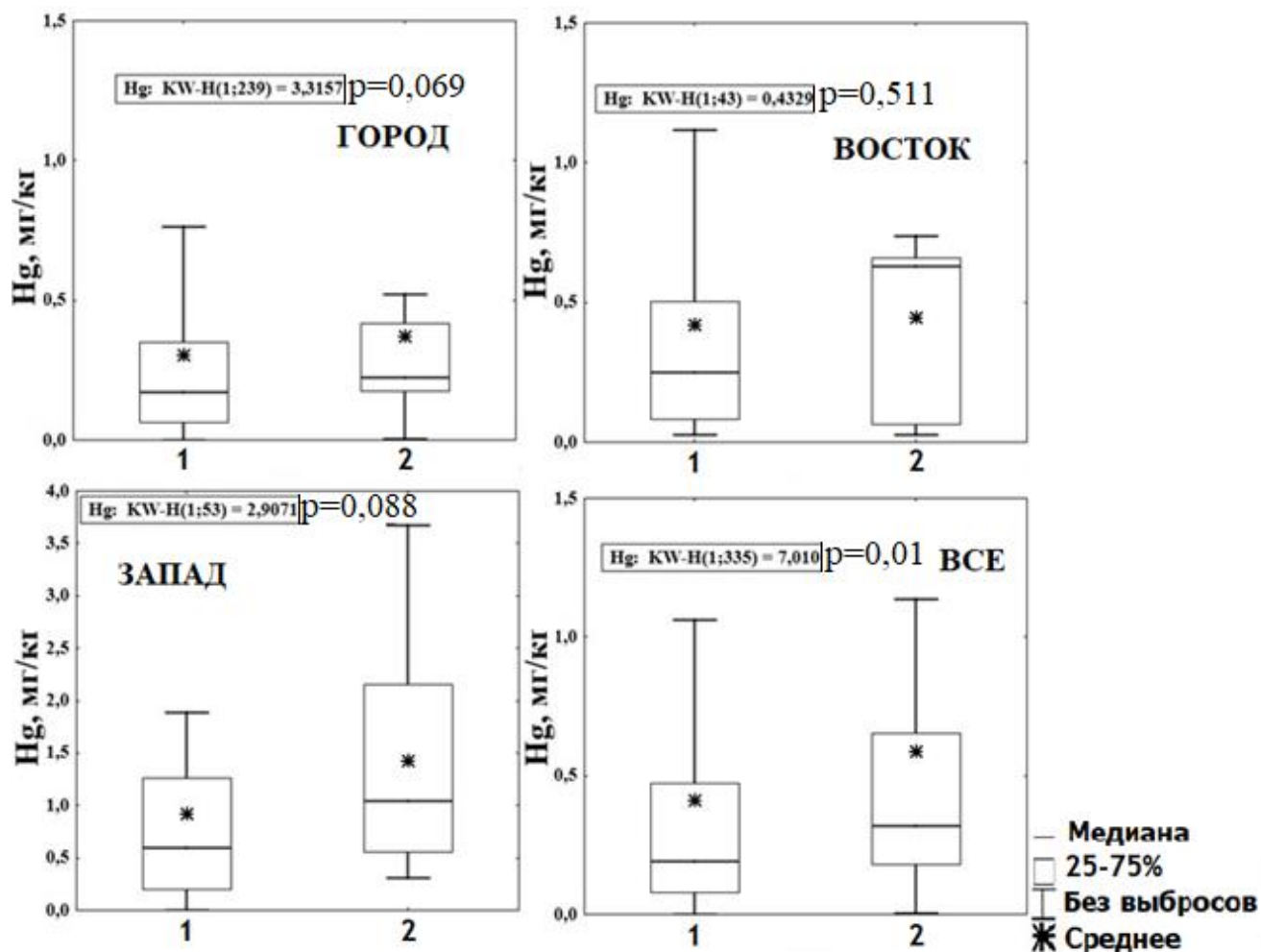


Рисунок 35 – Содержание ртути (мг/кг) в волосах некурящих (1) и курящих (2) людей

Значения $\delta^{15}\text{N}$ в волосах между курящими (9,94 ‰) и некурящими (9,79 ‰) людьми не различались (таблица 15, рисунок 36).

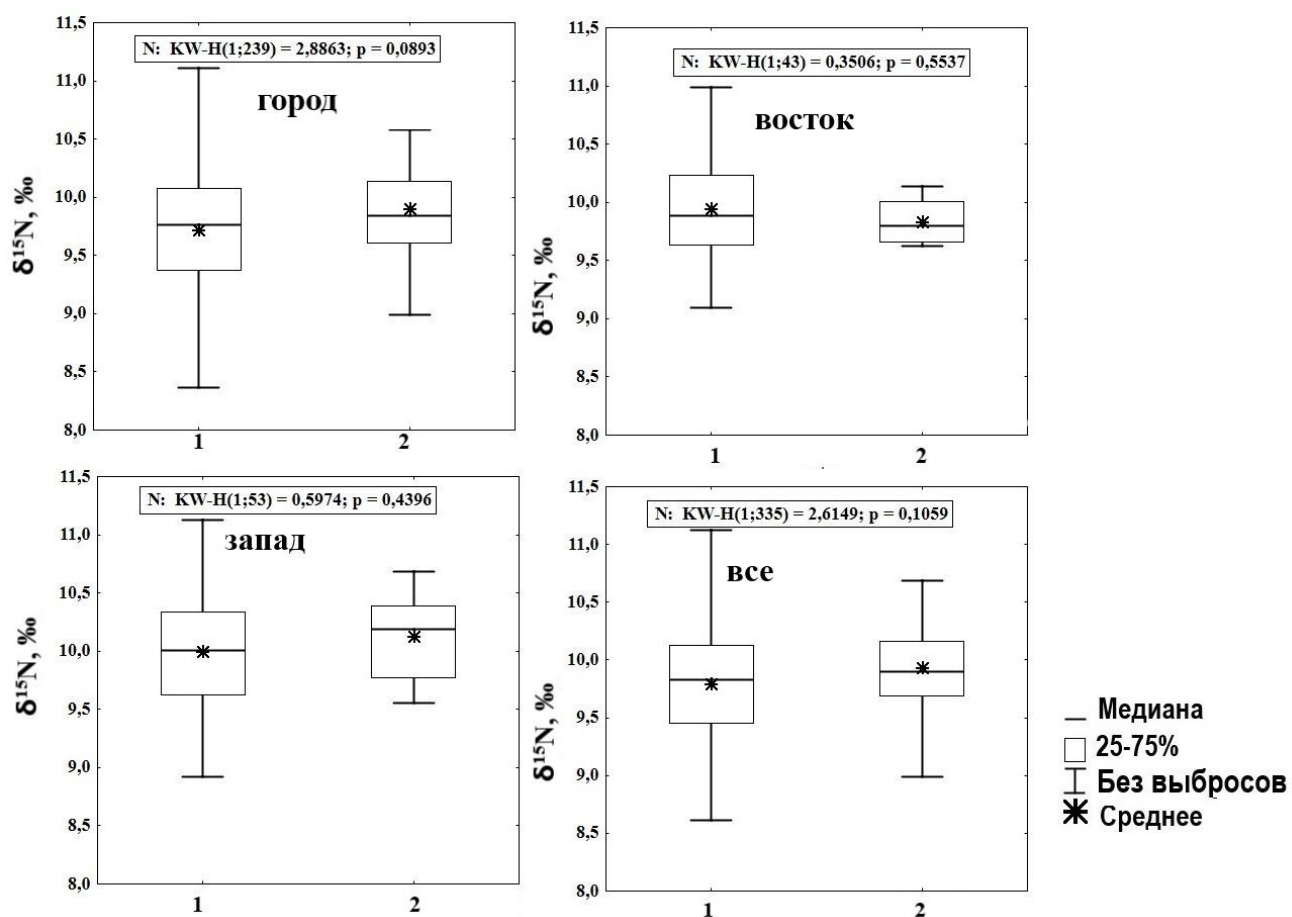


Рисунок 36 – Соотношение стабильных изотопов азота (‰) в волосах некурящих (1) и курящих (2) людей

Значения $\delta^{13}\text{C}$ в волосах статистически значимо выше у курящих ($-20,64$ ‰) по сравнению с некурящими ($-21,0$ ‰) (таблица 15, рисунок 37).

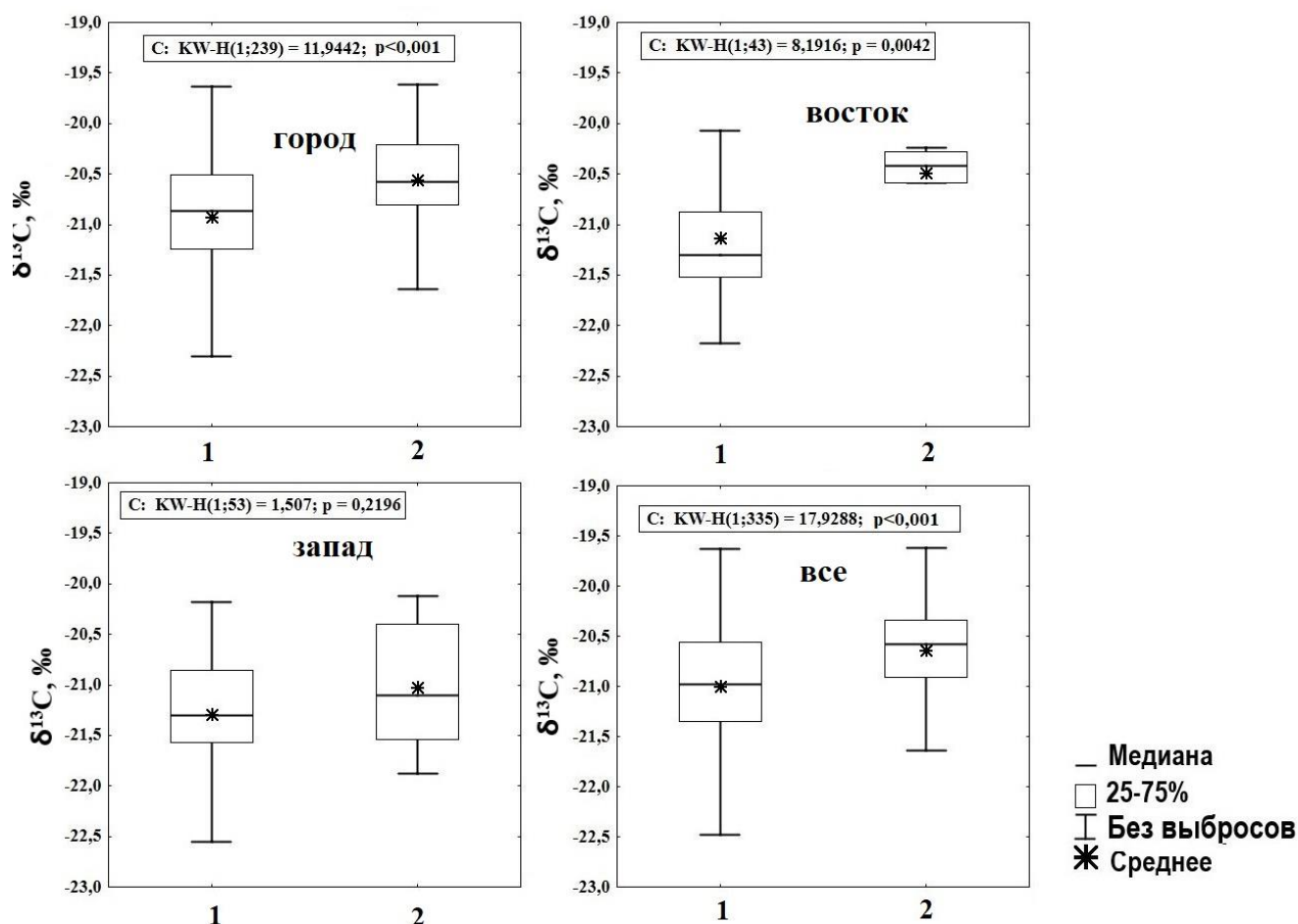


Рисунок 37 – Соотношение стабильных изотопов углерода (‰) в волосах некурящих (1) и курящих (2) людей

У городского населения, содержание ртути и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах курящих и некурящих людей статистически значимо не различались. Содержание ртути в волосах курящих и некурящих людей составляет $-0,37 \pm 0,08$ мг/кг и $0,3 \pm 0,03$ мг/кг соответственно (таблица 15, рисунок 35). Значения $\delta^{15}\text{N}$ в волосах курящих и некурящих составляет $-9,9$ ‰ и $9,72$ ‰ соответственно (таблица 15, рисунок 36). Значения $\delta^{13}\text{C}$ статистически значимо выше в волосах курящих людей ($-20,56$ ‰) по сравнению с некурящими ($-20,92$ ‰) (таблица 15, рисунок 37).

Содержание ртути и значение $\delta^{15}\text{N}$ в волосах между курящими и некурящими людьми востока области статистически значимо не различалось (таблица 15, рисунок 35, 36). Содержание ртути в волосах курящих и некурящих людей составляет $-0,45 \pm 0,11$ мг/кг и $0,42 \pm 0,08$ мг/кг соответственно (таблица 15, рисунок 35). Значения $\delta^{15}\text{N}$ в волосах курящих и некурящих составляет $-9,83$ ‰ и $9,94$ ‰

соответственно (таблица 15, рисунок 36). Значения $\delta^{13}\text{C}$ статистически значимо выше в волосах курящих людей ($-20,49\text{ ‰}$) по сравнению с некурящими ($-21,13\text{ ‰}$) (таблица 15, рисунок 37).

По содержанию ртути, значениям $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в волосах между курящими и некурящими людьми запада области статистически значимых различий не установлено (таблица 15, рисунок 35-37). Содержание ртути в волосах курящих и некурящих людей составляет $1,43 \pm 0,34$ мг/кг и $0,92 \pm 0,16$ мг/кг соответственно (таблица 15, рисунок 35). Значения $\delta^{15}\text{N}$ в волосах курящих и некурящих составляет $10,13\text{ ‰}$ и $10,0\text{ ‰}$ соответственно (таблица 15, рисунок 36). Значения $\delta^{13}\text{C}$ в волосах курящих и некурящих составляет $-21,02\text{ ‰}$ и $-21,29\text{ ‰}$ соответственно (таблица 15, рисунок 37).

ГЛАВА 6. Накопление ртути в организме человека и содержание белка в рационе питания

6.1. Связь накопления ртути в волосах населения, проживающего в городской и сельской местности

Содержание ртути в волосах населения Вологодской области варьирует в широких пределах от менее 0,001 до 7,640 мг/кг и составляет в среднем $0,445 \pm 0,018$ мг/кг.

Большая часть обследуемых (89,3%) имела уровень ртути ниже 1 мг/кг, в то время как у 10,7% зарегистрированы концентрации, превышающие это значение.

Частотное распределение ртути в волосах западного сельского населения отличалось от распределения ртути в волосах населения промышленно-административного центра и восточных районов: доля лиц с концентрацией ниже 0,5 мг/кг западных районов составила 53%, в то время как в промышленно-административном центре и в восточных районах — 82,9% и 75,9% соответственно.

Среднее содержание ртути в волосах людей, проживающих в западных районах Вологодской области, выше в несколько раз, чем уровни ртути в волосах людей городского населения и населения восточных районов. Это связано с тем, что в западных районах области преобладают высокие показатели озерности и степени заболоченности, в отличие от других районов региона (Абрамова, 1965; Антипов, 1981; Природа..., 1957; Природа..., 2007), что создаёт благоприятные условия для аккумуляции ртути в окружающей среде.

Содержание ртути в волосах населения промышленно-административного центра (0,307 мг/кг) и восточных районов (0,367 мг/кг) сопоставимы с результатами исследований стран Европы: Великобритании — 0,190 мг/кг (Lindow et al., 2003), Чехии — 0,240 мг/кг (Kruzikova et al., 2009), Швеции — 0,350 мг/кг (Björnberg et al., 2003). Среднее содержание ртути в волосах населения западных районов выше уровней ртути ряда Европейских стран (Великобритании, Чехии, Швеции), и сопоставимы с содержанием ртути в волосах жителей Испании (0,8 мг/кг) (Batista et al., 1996), США (0,83 мг/кг) (Gerstenberger et al., 1997), Китая — 0,83 мг/кг (Liu et al., 2008), Сундарбана, Индия, 0,80 мг/кг (Gibb et al., 2016).

Уровни содержания ртути в волосах населения исследованных районов Вологодской области в несколько раз ниже по сравнению с населением прибрежных территорий: Побережье Персидского залива, Иран (Бандар-Аббас – 1,56 мг/кг, Бушер – 1,97 мг/кг, Махшахр – 5,12 мг/кг) (Okati, Esmaili-sari, 2018), Колумбийская Амазония – 17,29 мг/кг (Olivero-Verbel et al., 2016), Япония – 1,82 мг/кг (Yasutake et al., 2004), Малайзия – 11,45 мг/кг (Hajeb et al., 2008), Камито, Колумбия – 4,91 мг/кг (Olivero et al., 2002). Уровни ртути в волосах данного исследования также значительно ниже по сравнению с территориями, где ведется мелкомасштабная добыча золота (Индонезия (9,405 мг/кг), Мьянма (2,264 мг/кг), Кения (5,260 мг/кг)) и где располагаются антропогенные источники поступления металла в окружающую среду (Таиланд — 4,339 мг/кг) (Bell et al., 2017).

Распределение ртути в волосах населения разных демографических групп. Для промышленно-административного центра установлено, что содержание ртути в волосах выше у женщин по сравнению мужчинами. При этом, различий по уровню ртути в волосах между мужчинами и женщинами, проживающих в сельской местности восточных и западных районов области, не установлено. Также отсутствие различий по содержанию ртути отмечено у жителей прибрежных городов Китая (мужчины – 0.94 мг/кг, женщины – 0.72 мг/кг) (Cheng et al., 2008), Французской Гвианы (мужчины – 9,4 мг/кг, женщины – 9,9 мг/кг) (Fujimura et al., 2011) и Бразилии (Santos-Lima et al., 2020). Отмечены различия по содержанию ртути между мужчинами (2,440 мг/кг) и женщинами (1,940 мг/кг) в районе Жоушен, Китай (Liu et al., 2008), Флориды (мужчины – 2.02 мг/кг, женщины – 0.96 мг/кг) (Schaefer et al., 2015), Неаполя, Италия (мужчины – 0.709 мг/кг, женщины – 0.563 мг/кг) (Diez et al., 2008), а также в волосах местного населения прибрежных общин Малайзии (у женщин больше, чем у мужчин) (Hajeb et al., 2008) и Японии (женщины – 1.43 мг/кг, мужчины – 2.55 мг/кг) (Yan et al., 2014; Yasutake et al., 2003).

Установлено, что содержание ртути в волосах населения увеличивается с возрастом. В исследованиях Пакистана (Shah et al., 2016) также установлены различия по возрасту. В ранее проведенных исследованиях прибрежных городов

Китай отмечено повышение концентраций ртути в волосах с возрастом (Cheng et al., 2008). В исследованиях северной Индии (Masih et al., 2016) отмечены повышения уровня ртути зависимо от возраста от 0,04 мг/кг до 0,11 мг/кг, на территории Французской Ривьеры (низкие уровни ртути были отмечены в волосах детей (0,36 мг/кг), высокие средние концентрации ртути были отмечены в волосах населения старше 40 лет (0,91 мг/кг) (Petrova et al., 2020).

Корреляционная связь между накоплением ртути в волосах и возрастом отмечена в исследовании Кувейта (Bou-Olayan, Al-Yakoob, 1994), Канады (Ratelle et al., 2020; Ripley et al., 2018). В исследовании на территории Янонама отмечена низкая значимая корреляция между концентрацией ртути и возрастом, в отличие от данного исследования, где уровень корреляции выше в 4 раза (Vega et al., 2018). Низкая значимая корреляция между концентрациями ртути и возрастом отмечена у мужчины из Теренггану, Малайзия (Hajeb et al., 2008). Однако, в исследовании у населения Италии обнаружена отрицательная корреляционная связь ($r_s = -0,345$ ($p < 0,001$)) (Diez et al., 2008).

Связь накопления ртути в волосах и курения.

Установлено, что содержание ртути в волосах курящих людей статистически значимо выше по сравнению с некурящими, однако для восточных районов различия не отмечены. В Китае также установлено, что содержание ртути выше в волосах, курящих ($0,45 \pm 0,27$ мг/кг) по сравнению с некурящими людьми ($0,29 \pm 0,14$ мг/кг) (Wu et al., 2020). Исследователи отмечают, что установленные различия возможны из-за накопленной ртути в табаке, которая могла попасть в организм человека в результате курения. Курение считалось важным источником (составляющим 11–18%) для расчетного суточного потребления общей ртути (Shao et al., 2013).

Распределение ртути в волосах населения с разным рационом питания.

На территории Вологодской области, основными промысловыми источниками рыбы являются водоемы западных районов: Белое озеро – 808,3 тонн, Рыбинское водохранилище – 376,9 тонн, Кубенское озеро – 183,7 тонн, Онежское озеро – 267,0 тонн, Шекснинское водохранилище – 95,3 тонн, озеро Воже – 64,0 тонн. При этом,

вылов на реках и малых озерах восточных районов составил 14,6 тонн (Комплексный..., 2017).

Содержание ртути в волосах жителей Вологодской области зависит от того, насколько регулярно рыба встречается в рационе, что сопоставимо результатами исследований, выполненных в разных странах. В центральной Польше (минимальные средние концентрации отмечены в волосах людей, которые не употребляют рыбу – 0,121 мг/кг, максимальные в волосах людей, которые употребляют рыбу несколько раз в неделю – 0,464 мг/кг) (Marcinek-Jacel et al., 2017). Согласно проекту DEMOCOPHES также обнаружены различия в зависимости от частоты потребляемой рыбы в волосах женщин и детей из Германии (Angerer et al., 2017). Во Французской Ривьере и на территории Северной Индии, уровни ртути в волосах выше у населения с частым потреблением рыбы в рационе питания (1,32 мг/кг и 0,16 мг/кг) по сравнению с теми, кто питается рыбой реже (0,42 мг/кг и 0,02 мг/кг) соответственно (Masih et al., 2016; Petrova et al., 2020). В Японии в районе полуострова Каракувочо, где рыба является основным источником питания, также отмечены различия в зависимости от частоты употребления рыбы у взрослого населения и у детей (Yan et al., 2014). В исследованиях на территории Канады (употребление рыбы менее 1 порции в месяц – 0,44 мг/кг, употребление рыбы чаще одной порции в месяц – 2,01 мг/кг) (Ripley et al., 2018) а также на территории Западной канадской Арктики люди, которые употребляют рыбу менее 1 раза в неделю (0,42 мг/кг) имеют концентрацию ртути в два раза меньше, чем у людей, которые употребляют рыбу более 5 раз в месяц (0,84 мг/кг) (Walker et al., 2020). В Иранском исследовании изучали накопление ртути в волосах женщин (менее 1 раза в месяц – 0,50 мг/кг, несколько раз в неделю – 3,55 мг/кг) (Okati et al., 2012). Различия по питанию были обнаружены и на территории побережья Персидского залива, Иран (потребление рыбы менее 1 раза в месяц – 0,83 мг/кг, несколько раз в неделю – 4,19 мг/кг) (Okati, Esmaili-sari, 2018), и в исследованиях на территории в Неаполе, Италии (употребляют рыбу – 0,761 мг/кг, не употребляют рыбу – 0,464 мг/кг) (Diez et al., 2008). 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.

Полученные результаты согласуются с результатами других работ, показывающих что рыба, употребляемая в пищу, является одним из основных источников ртути в организм человека (EFSA, 2018; Horvat et al., 2012; Mozaffarian, Rimm, 2006; Rice et al., 1997; Rose et al., 2015; Sheehan et al., 2014; Tong et al., 2017). Результаты анкетирования показывают, что жители Вологодской области в среднем употребляют $606,9 \pm 409$ грамм рыбы в месяц. Этот показатель в четыре раза ниже данных РОССТАТа (РОССТАТ, 2017). Городское население употребляет меньшее количество рыбы ($498,7 \pm 403$ грамм/месяц), чем сельское население восточных ($669,3 \pm 392$ грамм/месяц) и западных ($723,9 \pm 410$ грамм/месяц) районов области.

В Малайзии наблюдается такая же закономерность потребления рыбы: городское население потребляют рыбу гораздо в меньшем количестве, чем сельское, где отмечены высокие уровни ртути в волосах (Hajeb et al., 2008). Вероятнее всего, связано это с различием рациона питания, образом жизни и факторами окружающей среды. (Hajeb et al., 2008).

Для всех районов Вологодской области выявлена статистически значимая положительная корреляция между содержанием ртути в волосах и количеством употребляемой рыбы (грамм/месяц). Аналогичные корреляция выявлены у населения Малайзии (Hajeb et al., 2008), Марипасула, 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).

6.2. Содержание белка в рационе питания и значение изотопов азота и углерода

Для нормальной жизнедеятельности организма, необходимо ежедневное поступление белка. Основные источники белка – мясо животных, рыба и рыбопродукты, и в меньшей степени растительная пища (URL:

https://gateway.euro.who.int/ru/indicators/hfa_444-3221-protein-available-per-person-per-day-g/#id=19470).

Согласно данным FAO (продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций) и данным по белковому балансу для России РОССТАТ, высокое обеспечение белком (более 100 грамм в день на человека (животного, рыбьего и растительного)) характерно для США (109,1 грамм), Канады (102,1 грамм), ряда европейских стран – Финляндии (114,7 грамм), Италии (112,5 грамм), Франции (109,1 грамм), Норвегии (106,4 грамм), Германии (102,8 грамм), России (101,2 грамм), а также Австралии (102,9 грамм). Средневысокое обеспечение (80 – 99 грамм) белка характерно для стран Китая (96,7 грамм), Японии (86,5 грамм), Бразилии (91,3 грамм), Мексики (85,8 грамм), Швейцарии (89,6 грамм), Великобритании (99,1 грамм), Бельгии (97,4 грамм), а также для Новой Зеландии (89,5 грамм) (РОССТАТ, 2017, FAO, 2019) (таблица 16, рисунок 38).

Таблица 16 – 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	9,0	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

Продолжение таблицы 16

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)				(%)	
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, 2017 a- Hülsemann et al., 2015 b- Valenzuela et al., 2012 c- Valenzuela et al., 2011 d- Lehn et al., 2015								

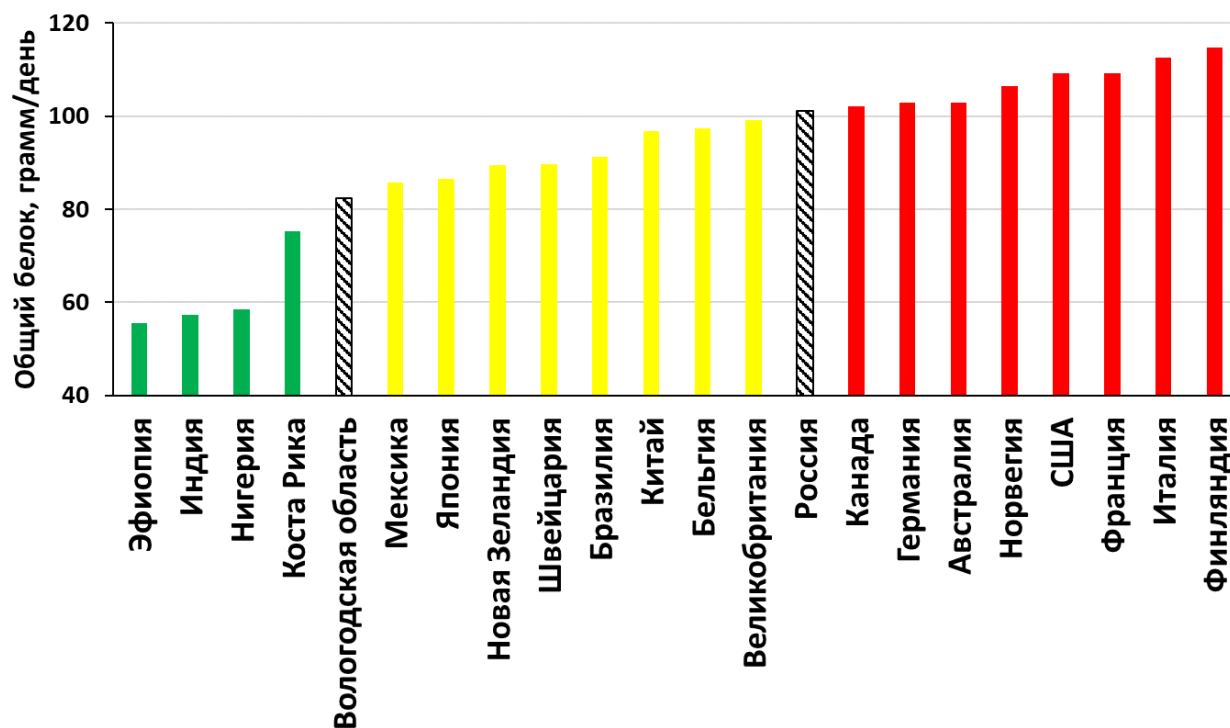


Рисунок 38 – Потребление общего белка, грамм/день для населения разных стран и исследуемого региона

На Американском континенте, в Коста-Рике одно из самых низких значений по количеству потребляемого белка в пищу (75,3 грамм) на душу населения. В странах Африки количество потребляемого белка с пищей одно из самых минимальных: для Нигерии – 58,4 грамм, Эфиопии – 55,6 грамм (рисунок 38).

Особо выделяются высоким потреблением рыбы (более 14 грамм в день) Норвегия и Япония. Относительно высокое потребление рыбы и рыбных продуктов (6,0-9,1 грамм в день) характерно для Китая и ряда европейских стран – Финляндии, Италии, Франции, России, а также Новой Зеландии, Австралии. Среднее потребление рыбы (3,7-6,0 грамм) характерно для стран Американского континента (США, Канада, Мексика, Коста Рика), Германии, Швейцарии. В Индии, Бразилии и в странах Африки, ежедневное потребление минимальное (от 0,1 -2,8 грамм в день) (таблица 16, рисунок 39).

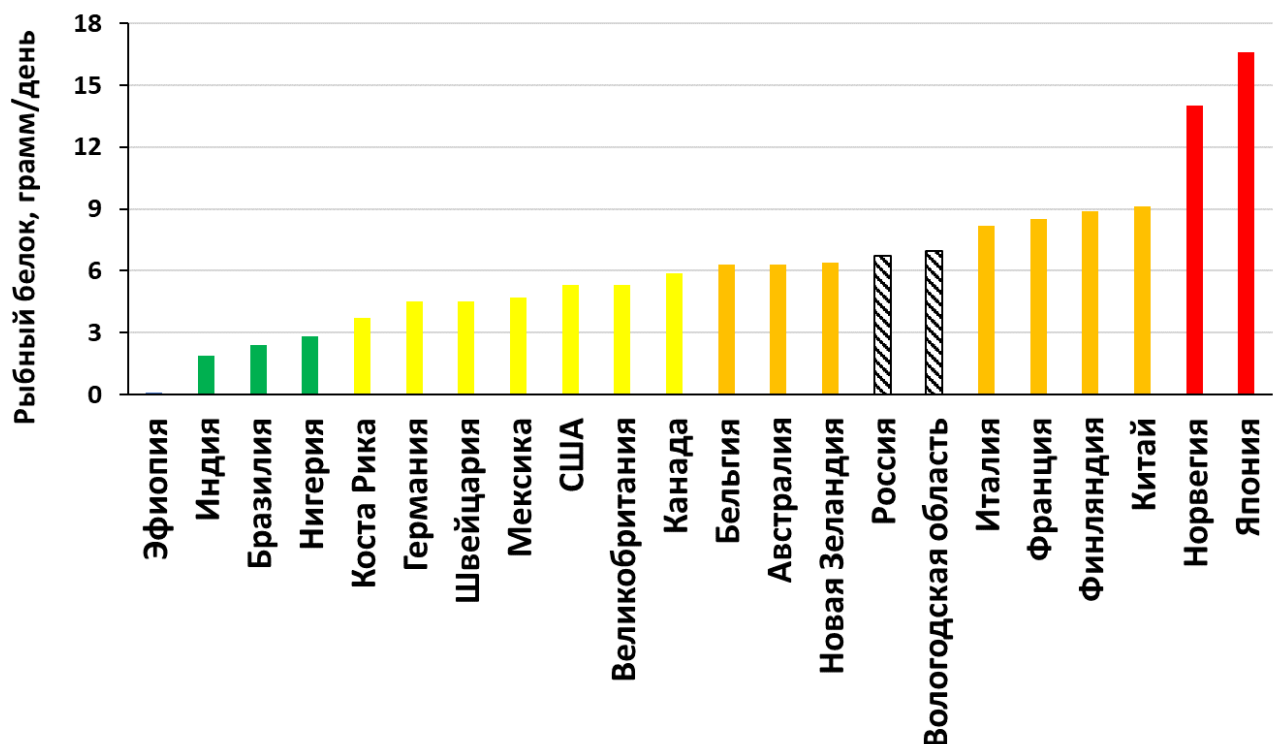


Рисунок 39 – Потребление рыбного белка, грамм/день для населения разных стран и исследуемого региона

Лидерами по животному белку являются Финляндия (70,7 грамм), Австралия (69,5 грамм), США (69,5 грамм) (таблица 16, рисунок 40).

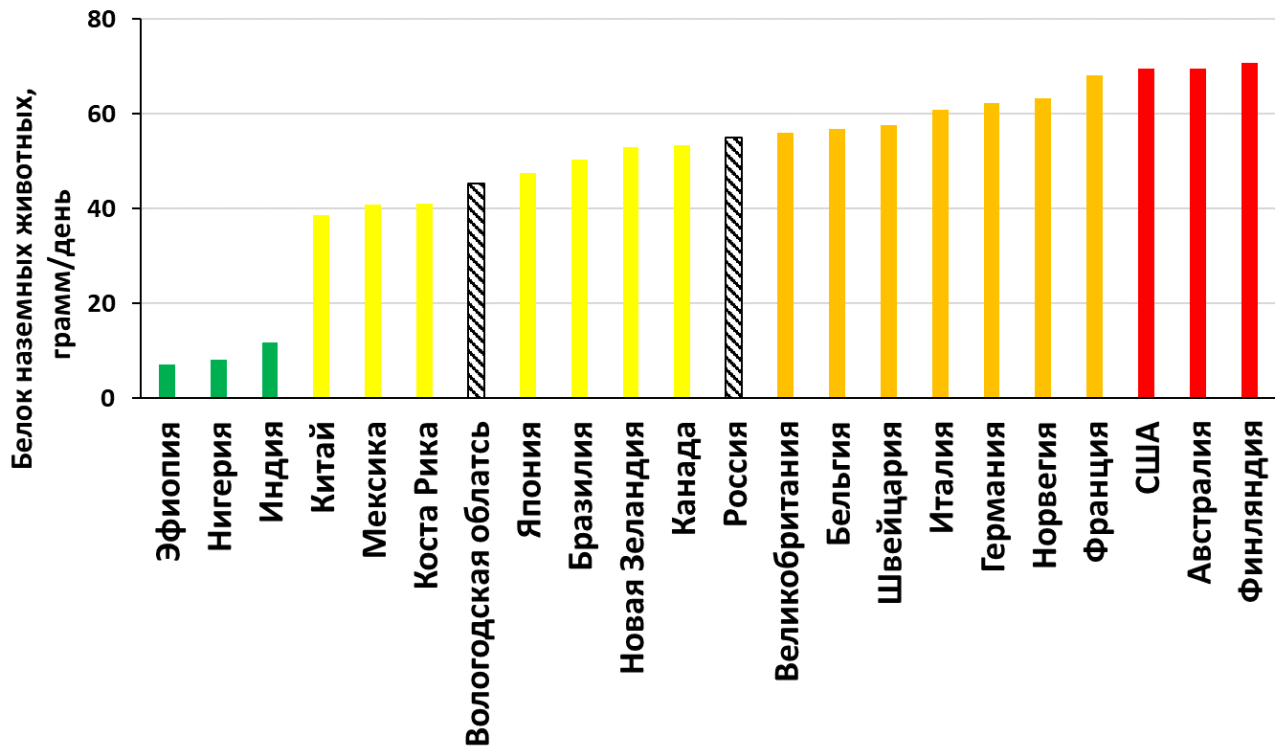


Рисунок 40 – Потребление белка наземных животных, грамм/день для населения разных стран и исследуемого региона

Для остальных Европейских стран потребление мяса наземного животного происхождения находится в диапазоне 54,9-68,2 грамм в день. Для стран американского континента, кроме США, диапазон потребления мяса в день от 40,8-53,4 грамм. В Японии и в Китае потребление животного белка в день на душу населения составляет 47,4 и 38,7 грамм соответственно. Для Индии и стран Африки потребление животного мяса от 7,1 до 11,7 грамм в день на душу населения (таблица 16, рисунок 40).

При сравнении соотношения белка рыбного происхождения к белку наземных животных, такие страны как Япония (35,0 %), Нигерия (34,3 %), Китай (23,6 %), Индия (16,6 %) и Норвегия (22,2 %) – страны с самым высоким потреблением рыбы по сравнению с животным белком (таблица 16, рисунок 41).

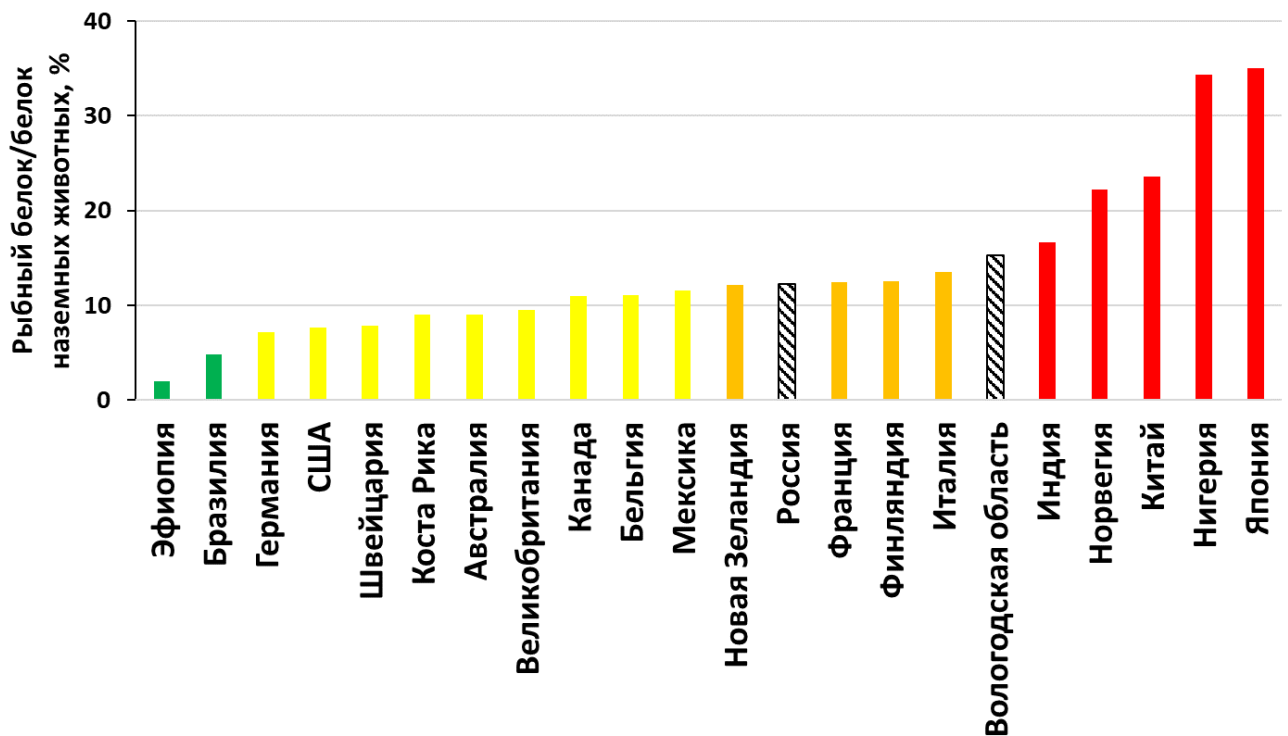


Рисунок 41 – Соотношение рыбного белка к белку наземных животных (%) для населения разных стран и исследуемого региона

Среди европейских стран Финляндия, Россия, Италия, Франция имеют примерно одинаковое соотношение потребления рыбного белка к белку наземных животных (12,0 %), для Новой Зеландии соотношение схоже. Бельгия, Германия, Великобритания, Швейцария имеют ниже (7,2-11,1%), чем в других европейских странах соотношение рыбного белка к животному. На Американском континенте потребление рыбы по отношению к животным ниже для стран Бразилия, США, Коста Рика от 4,8-9,0 %, для Канады и Мексики – 11,0 и 11,6%. Для Эфиопии самое низкое соотношение рыбного белка к животному (2,0 %) (таблица 16, рисунок 41).

В основу белкового рациона человека, помимо рыбного и животного белка входит и растительный белок.

Основным источником поступления ртути в организм человека являются не животные и растительная пища, а рыба и морепродукты. Поэтому, важна оценка доли рыбного белка в рационе питания населения. Самое высокое потребление рыбного белка, по сравнению с общим количеством белка характерно для Японии (19,2 %), Норвегии (13,2%), Китая (9,4%). На Океании доля рыбного к общему

белку соответствует 6,1-7,2 %. В Бельгии, Финляндии, Италии, Франции, России соотношение рыбы к общему белку варьирует от 6,5 до 7,8 %. Для Германии, Швейцарии, Великобритании этот показатель от 4,4 до 5,3 %. На Американском континенте, Канада с самым высоким показателем соотношения рыбы к общему белку (5,8%), Мексика (5,5%), Коста Рика (4,9%) и США (4,8%) имеют средние показатели этого соотношения, при этом, в Бразилии это показатель самый низкий (2,6%). В Индии (3,4%), Бразилии (2,6%) и в Эфиопии (0,3%) одни из минимальных показателей соотношения рыбы к общему белку (таблица 16, рисунок 42).

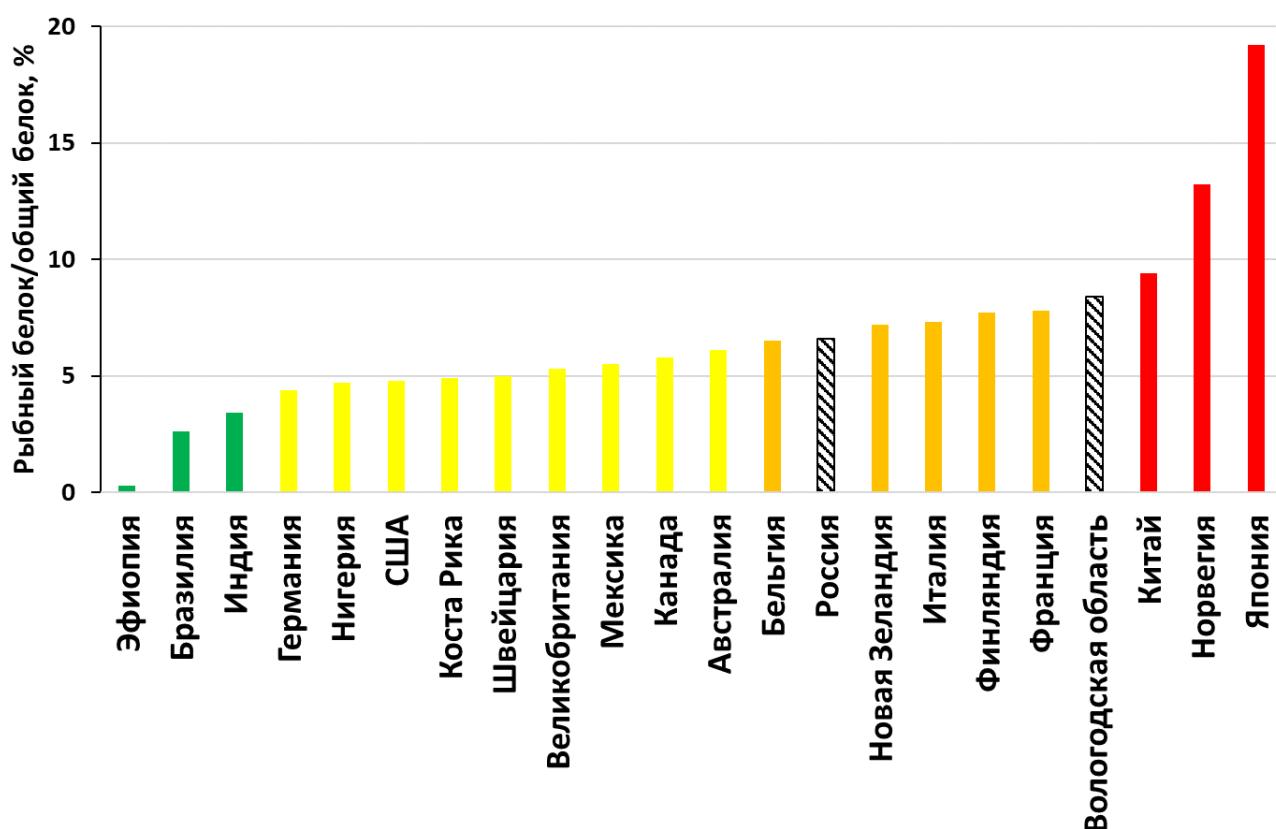


Рисунок 42 – Соотношение рыбного белка к общему белку (%) для населения разных стран и исследуемого региона

Таким образом, согласно FAO (FAO, 2019), Россия относится к странам с высоким потреблением общего белка на душу населения (101,2 грамм), и сопоставимо странам США (109,1 грамм), Канады (102,1 грамм), ряда европейских стран – Финляндии (114,7 грамм), Италии (112,5 грамм), Франции (109,1 грамм), Норвегии (106,4 грамм), Германии (102,8 грамм), а также Австралии (102,9 грамм). По потреблению рыбы и рыбных продуктов для России характерно относительно

высокое количество и сопоставимо с Китаем и рядом европейских стран – Финляндии, Италии, Франции, а также Новой Зеландии, Австралии. Животный белок, Россия, потребляет примерно также как и в Бельгии, Великобритании, Швейцарии, Канаде. Россия, как и ряд европейских стран Финляндия, Италия, Франция, а также Новая Зеландия имеют примерно одинаковое соотношение потребления рыбного белка к белку наземных животных (12 %). Соотношение рыбы к общему белку в России сопоставимо с показателями Бельгии, Финляндии, Италии, Франции.

В России, разные регионы имеют свои показатели потребления любого вида белка. На территории Вологодской области, потребление рыбы отличается от района проживания.

Согласно нашим расчётам по анкетным данным, жители Вологодской области в среднем употребляют 20,23 грамм рыбы в день, что в четыре раза меньше данных РОССТАТ (РОССТАТ, 2017). Городское население употребляет меньше количество рыбы (16,6 грамм/день), чем восточное (22,3 грамм/день) и западное население (24,13 грамм/день).

Согласно данным FAO по составу рыбы на 100 грамм приходится: 69 калорий, 10,9% белка, 2,5% жира (Procedures ..., 2001). Таким образом, согласно нашим расчетам, в целом на область ежедневно приходится – 2,2 грамм рыбного белка, для городского населения – 1,8 грамм, население восточных районов – 2,43 грамм, население западных районов – 2,63 грамм. Данные, полученные анкетным путем, сильно отличаются от данных, предложенным официальным РОССТАТ, для дальнейшего анализа и сравнения с другими странами, использовали данные официальных источников РОССТАТ.

Таким образом, согласно РОССТАТ, Вологодская область по потреблению белка ниже, чем в целом по России и относится к странам со средневысоким обеспечением белка и сопоставимо странам Китая (96,7 грамм), Японии (86,5 грамм), Бразилии (91,3 грамм), Мексики (85,8 грамм), Швейцарии (89,6 грамм), Великобритании (99,1 грамм), Бельгии (97,4 грамм), а также для Новой Зеландии (89,5 грамм). По потреблению рыбы и рыбных продуктов для региона характерно

относительно высокое количество и сопоставимо с Российским значением, а также с Китаем и рядом европейских стран – Финляндии, Италии, Франции, а также Новой Зеландии, Австралии. Животный белок в регионе потребляет меньше, чем в стране в целом, и сопоставимо с потреблением в Японии (47,4 грамм) и в странах американского континента (Канада, Бразилия, Мексика, Коста Рика). Вологодская область имеет соотношение потребления рыбного белка к белку наземных животных чуть выше, чем для страны в целом и ряда европейских стран Финляндия, Италия, Франция, а также Новой Зеландии. Соотношение рыбы к общему белку в регионе выше, по сравнению с Россией, и сопоставимо с показателями Китая, а также Финляндии, Италии и Франции.

Значения $\delta^{15}\text{N}$ могут указывать как на потребление мяса, так и на потребление рыбы. Незначительное увеличение $\delta^{15}\text{N}$ обычно используются в качестве показателей потребления мяса, тогда как более заметное увеличение $\delta^{15}\text{N}$ рассматривают как показатель потребления рыбным белком) (Huelsemann et al., 2013).

Высокие значения для Вологодской области $\delta^{15}\text{N}$ ($\geq 9.7 \text{ ‰}$) характерны для исследуемого региона со средневысоким обеспечением белка и стран (Финляндия, Россия, Австралия) с высоким обеспечением белка, при этом соотношение рыбного белка к общему на среднем уровне. Норвегия и Япония, страны с особо высоким потреблением рыбы (более 14 грамм в день) и с высоким процентом соотношения рыбного белка к общему, имеют значение $\delta^{15}\text{N}$ ниже (9,4 ‰). Самые низкие показатели $\delta^{15}\text{N}$ отмечены для Китая (8,5‰), Индии (8,4‰), Швейцарии (8,5‰), Новой Зеландии (8,2‰), Нигерии (8,52‰), Эфиопии (8,17‰) (таблица 16, рисунок 43).

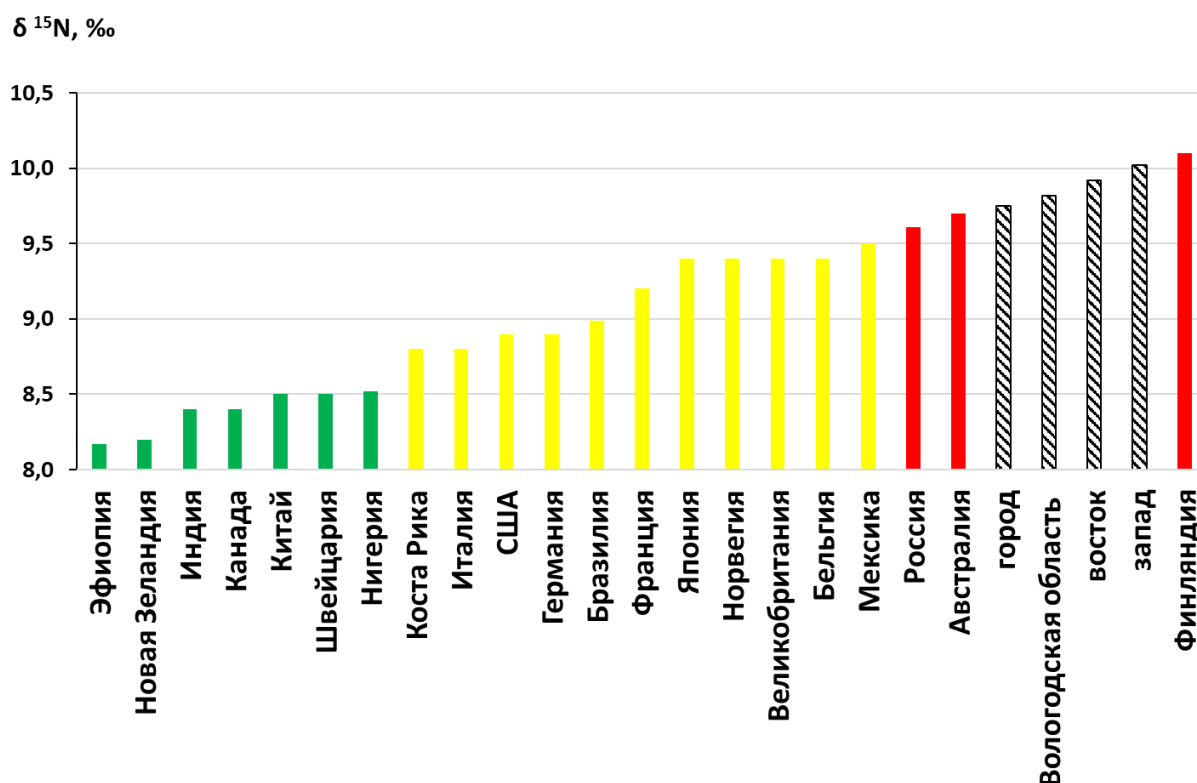


Рисунок 43 – Значение $\delta^{15}\text{N}$ (‰) в волосах населения исследуемого региона и других стран.

В Китае соотношения рыбного белка к общему в рационе, а также рыбного к животному одно из высоких по сравнению с другими странами, при этом значение соотношения стабильных изотопов азота ниже по сравнению с большим количеством стран. Это объясняется тем, что основным источником рыбного белка для населения Китая являются ракообразные и моллюски, которые занимают низкий трофический уровень по сравнению с промысловыми рыбами (FAO, 2019).

Нигерия, Эфиопия и Индия – страны с самым низким показателем потребляемого белка на душу населения, и потребление рыбы и животных также находится на низком уровне по сравнению с другими странами. При этом, в Нигерии соотношение рыбного белка к животному (34,3 %) также высокое, как и для Китая. Можно предположить, что основной белок население этих стран получают из растений, а также, в рационе питания преобладают растительные углеводы, которые имеют низкие значения $\delta^{15}\text{N}$, поскольку находятся на первом трофическом уровне в роли продуцентов.

Швейцария и Новая Зеландия – страны с умеренно высоким потреблением белка, при этом соотношение рыбного белка к животному и рыбного белка к общему выше для Новой Зеландии. Жители Новой Зеландии, как и население Китая, питаются морепродуктами, которые содержат низкое значение $\delta^{15}\text{N}$.

Среднее значение $\delta^{13}\text{C}$ в волосах жителей Вологодской области составляло – 20,98 ‰, что сопоставимо со значениями $\delta^{13}\text{C}$ в волосах европейских стран Норвегии (-21,0 ‰), Великобритании. Значения западных районов области (-21,34 ‰) сопоставимы с результатами Польши и Финляндии. При этом, среднее значение $\delta^{13}\text{C}$ в волосах общей выборки на 2-4 ‰ ниже по сравнению с Американским континентом (США, Аргентина, Бразилия, Канада, Коста Рика). Значения $\delta^{13}\text{C}$ в этих странах выше из-за развитой культуры потребления растения C4-пути фотосинтеза (кукуруза, в том числе кукурузные хлопья, соя, сахарный тростник). Также среднее значение $\delta^{13}\text{C}$ в волосах жителей северо-запада России ниже на 1-1,5 ‰ азиатских стран (Япония, Китай) и на 0,5 ‰ ниже, чем в Индии (таблица 16, рисунок 44).

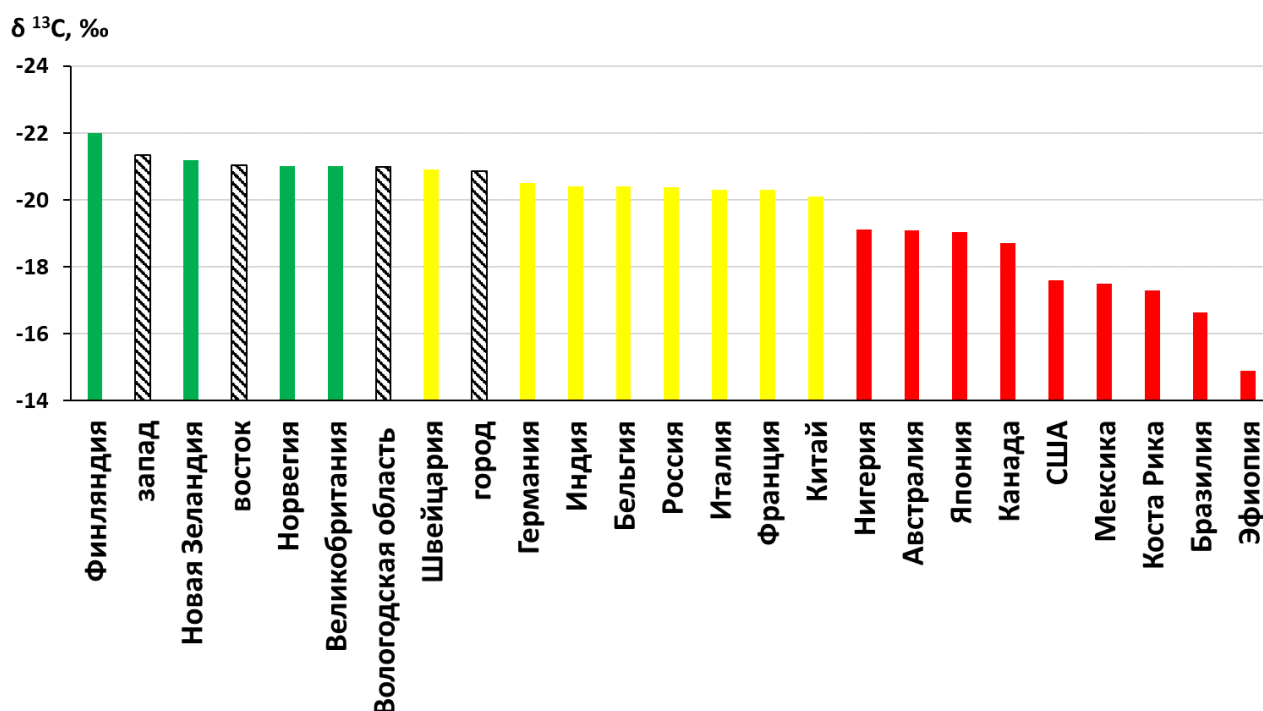


Рисунок 44 – Значение $\delta^{13}\text{C}$ (‰) в волосах населения исследуемого региона и других стран.

Величины $\delta^{13}\text{C}$ варьируются в широких пределах и отличаются в природе: растения, которые в основном приходятся в пищу европейским странам и исследуемому региону – это растения C_3 типа, с более легким значением изотопа углерода, в Америке помимо C_3 путь фотосинтеза, в пищу часто потребляют растения C_4 . При этом, в настоящее время актуален смешанный тип питания. К примеру, городское население исследуемого региона помимо продуктов C_3 -фотосинтеза с огорода и с магазина, имеет доступ и к продуктам C_4 -фотосинтеза (кукуруза, соевые продукты, тростниковый сахар).

Таким образом, 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 .

Значения $\delta^{13}\text{C}$ не зависят от типа (рыбный/наземный животный) белка для рассмотренных стран. Показатели углерода зависят от типа фотосинтеза (C_3/C_4 путь фотосинтеза) потребляемых растений и их продуктов переработки.

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 45).

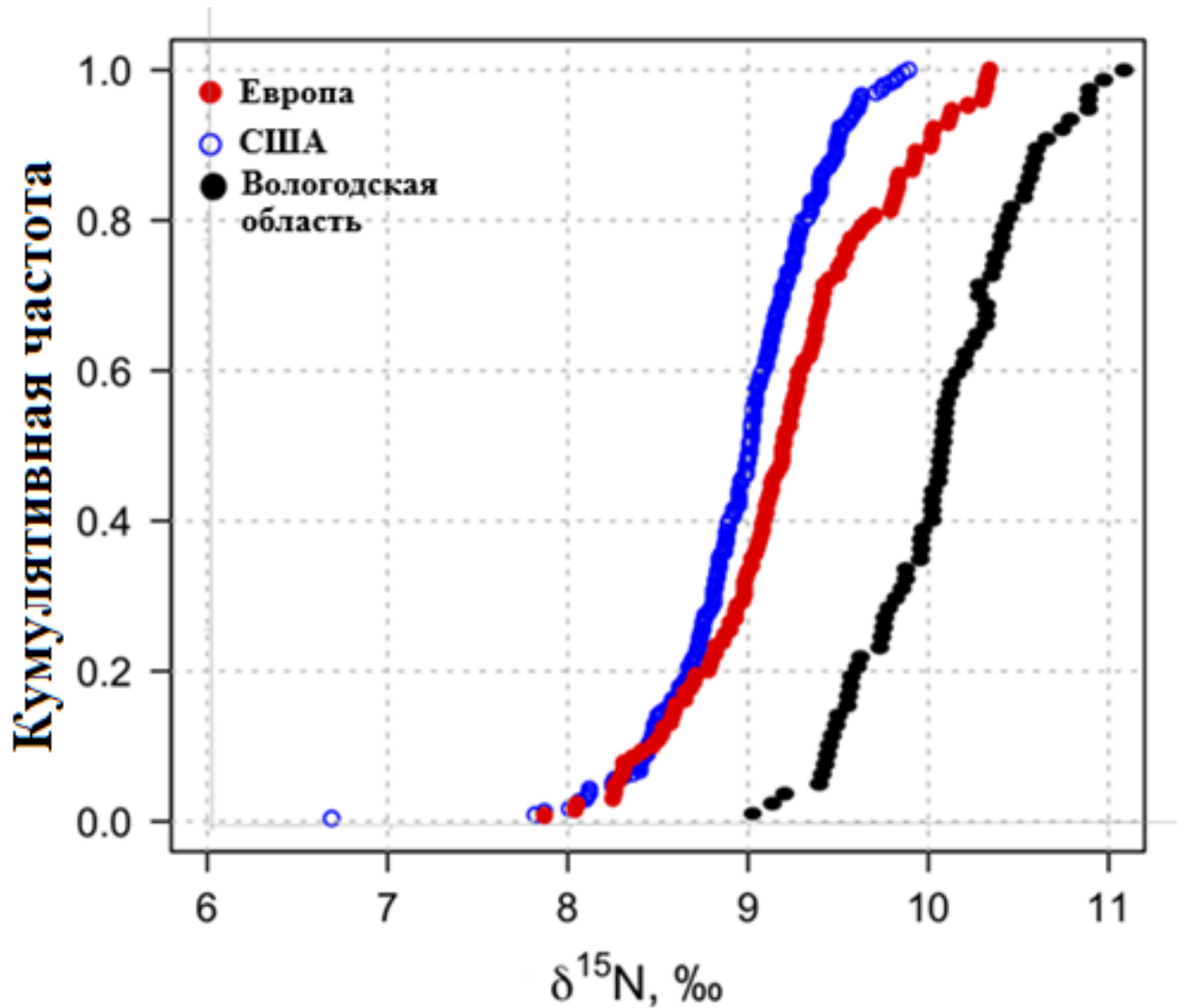


Рисунок 45 – Изотопный состав азота (‰) волос населения Вологодской области (Россия), Северной Америки (США), Финляндии, Германии, Италии, Франции, Норвегии (Европа) (Valenzuela et al., 2012)

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 46).

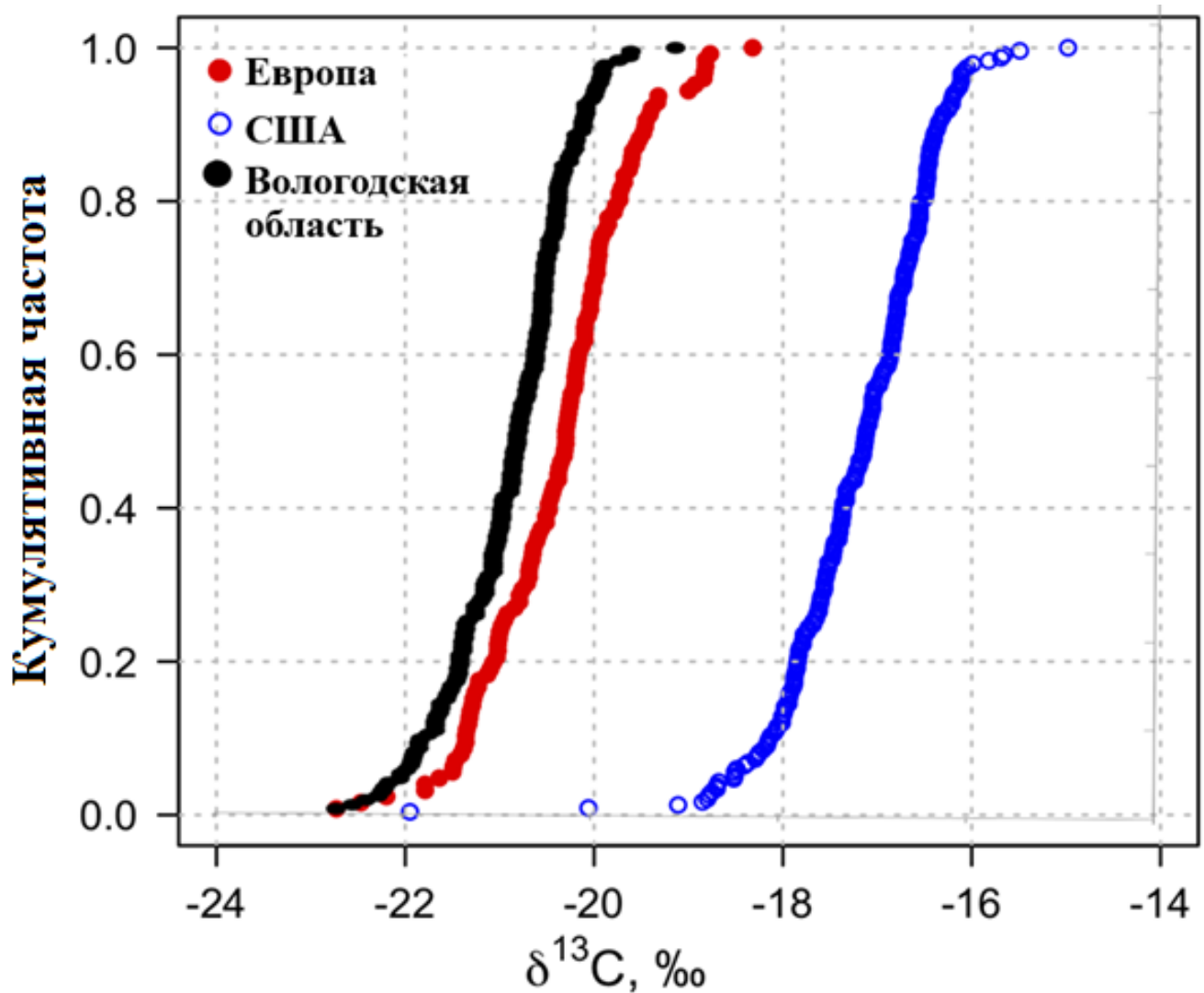


Рисунок 46 – Изотопный состав углерода (‰) волос населения Вологодской области (Россия), Северной Америки (США), Финляндии, Германии, Италии, Франции, Норвегии (Европа) (Valenzuela et al., 2012)

Считается, что изотопный состав углерода в волосах людей не зависит от типа (рыбный/наземный животный) потребляемого в пищу белка (Hülsemann et al., 2015; Valenzuela et al., 2011, 2012; Lehn et al., 2015). Уровень обогащения ^{13}C определяется типом фотосинтеза (C_3 или C_4 -фотосинтез) у преобладающих в рационе людей растений и их продуктов переработки. C_3 -растения при фотосинтезе включают в свои ткани преимущественно легкий изотоп углерода ^{12}C , а C_4 -растения обогащены тяжелым изотопом ^{13}C (Schoeninger, Moor, 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 ‰) и Великобритании (-21,0‰). Уровень обогащения ^{13}C у жителей западных районов области (-21,34‰) сопоставим с величинами, отмеченными у населения Финляндии (-22,0‰). 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 C_4 -фотосинтеза (кукуруза, в том числе кукурузные хлопья, соя, сахарный тростник). Также среднее 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 16).

6.3. Содержание ртути (мг/кг) в мышцах рыб из местных водоемов и рыбных продуктов торговой сети

Полученные результаты согласуются с результатами других работ, показывающих что рыба – основной источник ртути в организме человека (EFSA, 2018; Horvat et al., 2012; Mozaffarian, Rimm, 2006; Rice et al., 1997; Rose et al., 2015; Sheehan et al., 2014; Tong et al., 2017).

Используя формулу (4), 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).

Рассчитанные концентрации ртути по формуле 4 в мышцах рыб для каждого региона, мы сопоставили уже с известными данными по содержанию ртути в мышцах промысловых видов рыб Вологодской области (Ivanova et al., 2023).

Среднее содержание ртути в мышцах мирных видов рыб Вологодской области составляет: для плотвы - $0,14 \pm 0,01$ мг/кг, леща - $0,13 \pm 0,01$ мг/кг. Содержание ртути в мышцах хищных видов рыб составляет – $0,27 \pm 0,01$ мг/кг для окуня и $0,36 \pm 0,03$ мг/кг для щуки.

Содержание ртути в консервах из маркетов Вологодской области следующее: минимальные средние значения установлены для таких видов, как килька ($0,019 \pm 0,002$) и сельдь ($0,027 \pm 0,003$). Невысокие показатели отмечены для горбуши ($0,033 \pm 0,004$), скумбрии ($0,034 \pm 0,003$), сайры ($0,056 \pm 0,004$) и сардины ($0,044 \pm 0,010$). Максимальные – для тунца ($0,148 \pm 0,018$), сома ($0,355 \pm 0,090$), щуки ($0,361 \pm 0,084$).

Полученные данные соответствуют расчетам по содержанию ртути в мышцах рыб, исходя из значения ртути в волосах. Таким образом, полученное рассчитанное значение ртути в мышцах рыб индустриальной части сопоставимы с уровнями ртути в мышцах мирных и хищных видов рыб, отловленных из рек и озер, доступных городскому жителю (рисунок 47).

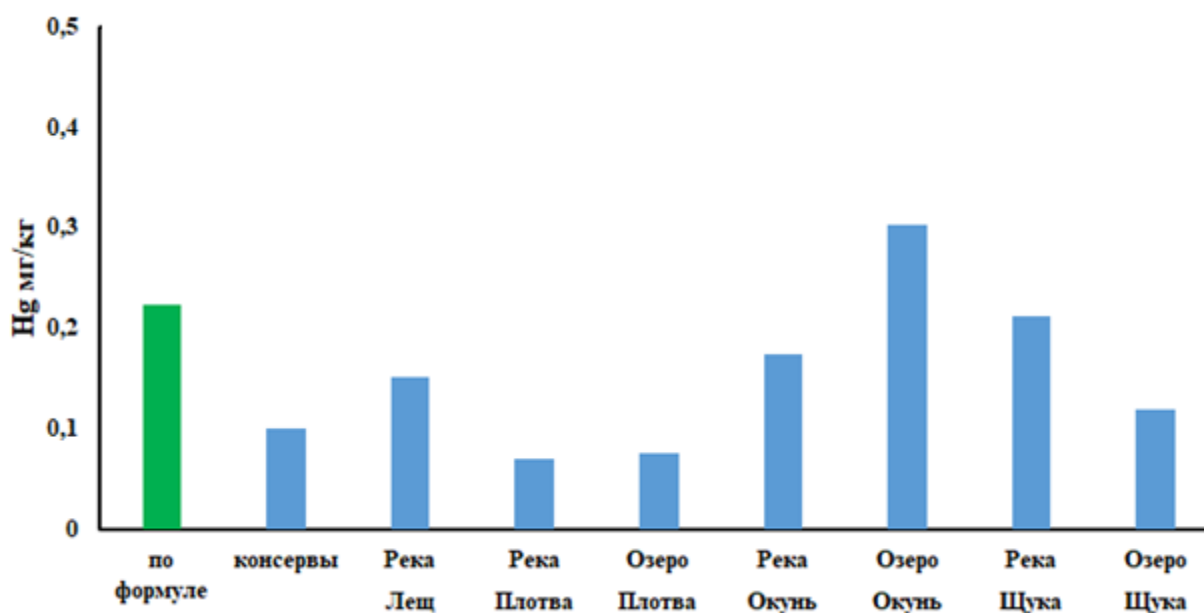


Рисунок 47 – Содержание ртути (мг/кг), рассчитанное по формуле в мышцах рыб и реальные значения ртути в мышцах рыб из торговой сети и водоемов территории промышленно-административного центра региона.

Также, рассчитанное содержание ртути в мышцах рыб соответствует среднему значению ртути в консервах (0,148 мг/кг для тунца, 0,044 мг/кг для сардины) (Иванова и др., 2018) и лососевых видов рыб торговой сети (0,005-0,6 мг/кг) (Почицкая и др., 2018).

Рассчитанные значения ртути в мышцах рыб, потребляемой населением восточных районов области, находятся между уровнями ртути в мышцах рыб леща (0,116 мг/кг), плотвы (0,124 мг/кг) из реки и леща (0,23 мг/кг) из озера, хищной рыбы окуня из реки (0,245 мг/кг) (рисунок 48).

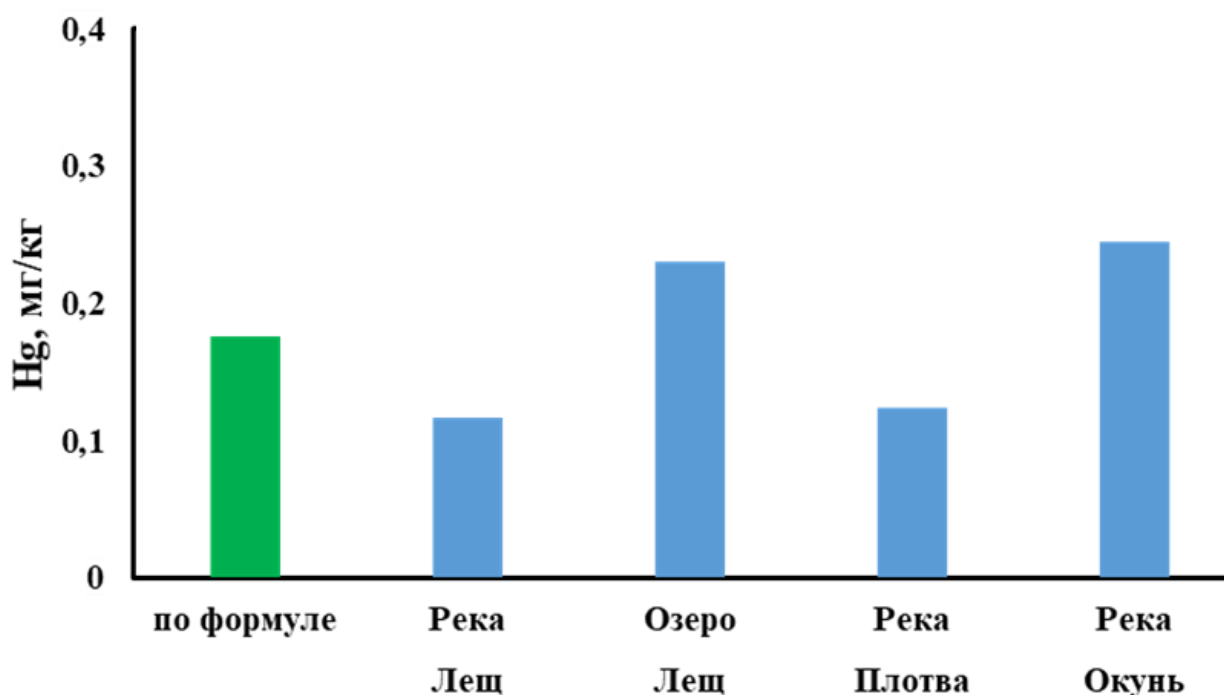


Рисунок 48 – Содержание ртути (мг/кг), рассчитанное по формуле в мышцах рыб и реальные значения ртути в мышцах рыб из местных водоемов восточных районов региона.

Полученное рассчитанное значение ртути в мышцах рыб западной части области (0,420 мг/кг) сопоставимы с уровнями ртути, отмеченными в мышцах хищных видов рыб: окунь из реки – 0,328 мг/кг, окунь из озера – 0,357 мг/кг, щука из озера – 0,464 мг/кг (рисунок 49).

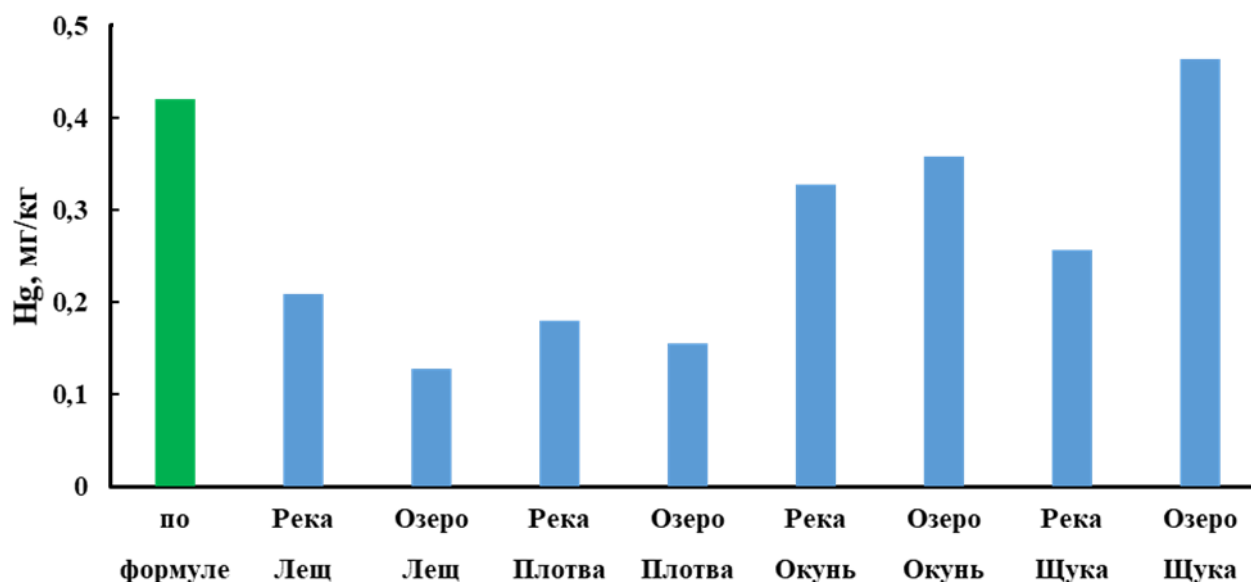


Рисунок 49 – Содержание ртути (мг/кг), рассчитанное по формуле в мышцах рыб и реальные значения ртути в мышцах рыб из местных водоемов западных районов региона.

Таким образом, рассчитанное содержание ртути в мышцах рыб сопоставимо с данными по уровню ртути в мышцах разных видов рыб из рек и озер. 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: структуры 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, проведенных в Европе, Америке и Азии.

Содержание ртути в волосах мужчин и женщин не отличается в волосах 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 организм человека. Аналогично результатам, ранее полученным за рубежом, содержание ртути в волосах Вологодской области положительно коррелирует с соотношением стабильных изотопов азота на всей территории региона. Концентрации ртути в волосах

положительно коррелируют с соотношением стабильных изотопов углерода для населения западных районов области и в целом по выборке. Однако такой связи не обнаружено в восточных районах и в промышленно-административном центре 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, промежуточные – у сельского населения восточных районов ($0,367 \pm 0,023$ мг/кг), минимальные – у населения, проживающего в промышленно-административном центре Вологодской области.

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 выходят 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова Т.Г. Болота Вологодской области, их районирование и сельскохозяйственное использование / Т.Г. Абрамова // Северо-Запад Европейской части СССР: сб.; отв. ред. А.И. Зубков. – 1965. – Вып. 4. – С. 65-92.
2. Антипов Н.П. Озерные ландшафты Вологодской области / Н.П. Антипов // Сб.статей Озерные ресурсы Вологодской области. - 1981. - С. 5-15
3. Атлас Вологодской области: адм. деление – на 01.07. 2007: [физический] / сост. и подгот. к изданию ФГУП «Аэрогеодезия» – Санкт-Петербург: "Аэрогеодезия"; Череповец: "Порт-Апрель", 2007. – 1 атл. (108 с.): цв., карты, текст, табл., диагр., граф., разрезы, ил.: 23х25 см. – ISBN 978-5-98007-021-2 (Порт-Апрель). Изображение (картографическое; неподвижное; двумерное): непосредственное.
4. Болотова, Н.Л. Об изученности водоемов Вологодской области / Н.Л. Болотова [и др.] // Географические исследования природы, населения, хозяйства Вологодской области; отв. ред. Г.А. Воробьев. – Вологда, 2000. - С. 27-30.
5. Всемирная организация здравоохранения // Количество белков на человека г/день. [Электронный ресурс] – URL: https://gateway.euro.who.int/ru/indicators/hfa_444-3221-protein-available-per-person-per-day-g/#id=19470 (дата обращения: 09.07.2025)
6. Геология СССР. В 2 томах. Том 2. Архангельская, Вологодская области и Коми АССР. Часть 1. / под ред. С.Н. Волкова, А.И. Зоричевой // Государственный геологический комитет СССР. – М.: Недра, 1963. – 1105 с.
7. Глашев А.А. Медицинское право: практическое руководство для юристов и медиков / А.А. Глашев // М.: Волтерс Клувер, 2004. – 202 с.
8. Горбунов, А.В. Оценка потребления ртути от потребления рыбы и морепродуктов в России / А.В. Горбунов [и др.] // Наука о продуктах питания и питании. - 2016. - Т. 7. - №. 07. - С. 516.
9. Иванова, Е. С. Оценка количества потребления ртути из рыбных консервов / Е. С. Иванова, В. Т. Комов, А. В. Рожко // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XVI Всероссийской научно-

практической конференции с международным участием, Киров, 03–05 декабря 2018 года. Том Книга 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2018. – С. 256-259.

10. Кичигин, А. Н. Геоморфологическое районирование Вологодской области / А.Н. Кичигин // Геология и география Вологодской области. – 2007. – С. 65-80.
11. Комов, В.Т. Причины и последствия антропогенного закисления озер: курс лекций / В.Т. Комов // Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2007. – 112 с.
12. Комов, В.Т. Содержание ртути в мышцах рыб из водоемов Северо-Запада России: Причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей / В.Т. Комов, И.К. Степанова, В.А. Гремячих // Актуальные проблемы водной токсикологии. – Борок: ИБВ РАН. – 2004. – С. 99–123
13. Комплексный территориальный кадастр природных ресурсов Вологодской области. Выпуск 21 (на 01.01.2017) / Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области - Вологда, 2017. – 488 с.
14. Металлогения ртути / Ред. акад. В. И. Смирнов [и др.]. - Москва: Недра, 1976. - 256 с.
15. Немова, Н.Н. Ртуть в рыбах: биохимическая индикация / Н.Н Немова, Л.А. Лысенко, О.В. Мещерякова, В.Т. Комов // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». – 2014. – Т. 6. – № 2. – С. 176-186.
16. Ориентировочные фоновые и допустимые биологические уровни некоторых тяжелых металлов в биосубстратах у населения, не имеющего с ними профессионального контакта. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Приложение 1. Утверждено МПР РФ 30.11.1992.].
17. Почицкая, И.М. Исследование содержания ртути в рыбе и объектах нерыбного промысла методом атомно-абсорбционной спектроскопии / И.М. Почицкая, Е.С. Александровская, В.Е. Денисюк [и др.] // Пищевая промышленность: наука и технологии. - 2018. - Вып.11(4). - С. 63-70.

18. Природа Вологодской области / Гл. ред. Г.А. Воробьев. Вологда: Издательский дом «Вологжанин», 2007. 440 с.
19. Природа Вологодской области: Сб. статей. Вологда: Обл. кн. редакция, 1957. 328 с.).
20. Росстат. Потребление продуктов питания в домашних хозяйствах в 2017 году [Электронный ресурс]: приложение: Потребление продовольствия субъектами Российской Федерации / Федер. служба гос. статистики. – Электрон. дан. – Москва, 2017. – URL: https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b18_101/Main.htm.
21. Ртуть: Справочник химика [Электронный ресурс] URL: <http://chem100.ru/text.php?t=1731> (дата обращения: 24.09.2024)
22. Трахтенберг И.М. Ртуть и ее соединения / И.М. Трахтенберг, М.Н. Коршун // Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I–IV групп. – Л.: Химия. – 1988. - С. 170–188.
23. Удоденко, Ю. Г. Содержание ртути в почвенных беспозвоночных рекреационной зоны крупного промышленного города (г. Череповец) / Ю.Г. Удоденко, Е.С. Иванова, В.Т. Комов [и др.] // Труды ИБВВ РАН. – 2022. - №100 (103). - С.57–64.
24. Филенко Р.А. Воды Вологодской области / Р.А. Филенко // Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1966. – 132 с.
25. Шувалова, О.П. Влияние накопления ртути на состояние здоровья женщин репродуктивного возраста / О.П. Шувалова, Е.С. Иванова, В.Т. Комов // Здоровье населения и среда обитания. – 2018. – Вып. 11(308). – С. 36–39.
26. Экономика // Официальный портал Правительства Вологодской области. [Электронный ресурс] URL: https://vologda-oblast.ru/o_region/ekonomika/ (дата обращения 20.08.2025)
27. Экономика Вологодской области // Большая информационная библиотека. [Электронный ресурс] URL: http://www.rcp.ru/geografiya_ekonomicheskaya_geografiya/ekonomika_vologodskoj_oblasti.html (дата обращения: 20.08.2025).

28. Янин Е.П. Ртуть в России: производство и потребление. / Е.П. Янин // М.: Изд-во ИМГРЭ, 2004 – 38 с.
29. Abernethy, D.R. USP Metal Impurities Advisory Panel. Metal impurities in food and drugs / D.R. Abernethy, A.J. Destefano, T.L. Cecil et al // Pharm Res. – 2010. – Vol. 27(5). – P. 750–755.
30. Adimado, A. A. Mercury in Human Blood, Urine, Hair, Nail, and Fish from the Ankobra and Tano River Basins in Southwestern Ghana / A. A. Adimado., D. A. Baah // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 2002. – Vol. 68:339. – P. 339– 346.
31. Aleksina, Iu. Factors affecting the mercury concentration in the hair of young residents of the Vologda region, Russia / Iu. Aleksina, V. Komov // Heliyon. – 2020. – Vol. 6.
32. Amirbahman A. Association of methylmercury with dissolved humic acids / A. Amirbahman., A.L. Reid, T.A. Haines et al. // Environ. Sci. Technol. – 2002. – Vol. 36. – P. 690–695.
33. Andersen H.R., J.B. Nielsen, P. Grandjean, «Toxicologic evidence of developmental neurotoxicity of environmental chemicals» / H.R. Andersen., J.B. Nielsen, P. Grandjean // Toxicology. – 2005. – Vol. 144(1–3). – P. 121–127.
34. Angerer, J. Human biomonitoring pilot study DEMOCOPHES in Germany: Contribution to a harmonize European approach / J. Angerer, K. Birgit, A. Castano et al // International Journal of Hygiene and Environmental Health. – 2017. – Vol. 220 (4). – P. 686-696.
35. Ariya, P.A. Mercury physicochemical and biogeochemical transformation in the atmosphere and at atmospheric interfaces: a review and future directions / P.A. Ariya, M. Amyot, A. Dastoor, D. Deeds et al// Chem. Rev. – 2015. – Vol. 115(10). – P. 3760-3802.
36. Batista J. Mercury in hair for a child population from Tarragona Province, Spain / J Batista, M. Schuhmacher, J.L. Domingo et al // Sci Total Environ. – 1996. – Vol. 193. – P. 143–148.
37. Bell, L. Mercury in women of child-bearing age in 25 countries / L. Bell, D. Evers, S. Johnson et al // Göteborg: IPEN and Biodiversity Research Institute, 2017. – P. 69.

38. Bellanger, M. Economic benefits of methylmercury exposure control in Europe: monetary value of neurotoxicity prevention / M. Bellanger., C. Pichery, D. Aerts et al // *Environ Health*. – 2013. – Vol. 12. – P. 3.
39. Bender, M. M. Variations in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbon dioxide fixation / M.M. Bender // *Phytochemistry*. – 1971. – T. 10. – №. 6. – P. 1239–1244.
40. Berglund, M. Inter-individual variations of human mercury exposure biomarkers: a cross-sectional assessment. / M. Berglund, B. Lind, K.A. Björnberg et al // *Environmental health: a global access science source*. – 2005. – Vol. 4. –P. 20.
41. Björnberg, K.A. Methyl mercury and inorganic mercury in Swedish pregnant women and in cord blood: influence of fish consumption / K.A. Björnberg, M. Vahter, K. Petersson-Grawe et al // *Environ Health Perspectives*. - 2003. - Vol. 111(4). - P. 637–641.
42. Blake, B. Toxicology of the nervous system / B. Blake. – 3rd ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons Inc., 2004. P. 279–297.
43. Bloomfield, A.L. Temperature and diet affect carbon and nitrogen isotopes of fish muscle: can amino acid nitrogen isotopes explain effects? / A.L. Bloomfield, T.S. Elsdon, B.D. Walther et al // *J Exp Mar Biol Ecol*. – 2011. – Vol. 399(1). – P. 48–59.
44. Bou-Olayan, A. Mercury in human hair: a study of residents in Kuwait / A. Bou-Olayan, S. Al-Yakoob // *Journal of Environmental Science and Health*. – 1994. – Vol. 29. – P. 1541–1551.
45. Brodzka, R. Mercury in hair – an indicator of environmental exposure / R. Brodzka, M. Trzcinka-Ochocka // *Med Pr*. – 2009. – Vol. 60(4). – P. 303–314.
46. Careddu, G. (2021) Gaining insight into the assimilated diet of small bear populations by stable isotope analysis / G. Careddu, P. Ciucci, S. Mondovì et al // *Sci Rep*. - 2021. - Vol. 11(1). - P. 1–16.
47. Celo, V. Abiotic methylation of mercury in the aquatic environment / V. Celo, D.R. Lean, S.L. Scott // *Sci Total Environ*. – 2006. – Vol. 368 (1). – P. 126–37.
48. Chen, S. Health Risk Assessment for Local Residents from the South China Sea Based on Mercury Concentrations in Marine Fish / S. Chen, Z. Chen, P. Wang et al //

Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. – 2018. – Vol. 101(3). – P. 398–402.

49. Cheng, J. Mercury concentration in hair samples from Chinese people in coastal cities / J. Cheng, S. Honda, X. Liu et al // Journal of Environmental Sciences. – 2008. – Vol. 20. – P. 1258-1262.

50. Clarkson, T. The toxicology of mercury and its chemical compounds / T. W. Clarkson, L. Magos // Critical reviews in toxicology. – 2006. – Vol. 36(8). – P. 609–662.

51. Cohen, M.D. Modeling the global atmospheric transport and deposition of mercury to the Great Lakes / M.D. Cohen; R.R. Draxler; R.S. Artz et al // Elementa Sci. Anthropocene. – 2016. – Vol.4. – P. 1–25.

52. Colombo, M. J. Anaerobic oxidation of Hg (0) and methylmercury formation by *Desulfovibrio desulfuricans* ND132 / M.J. Colombo, J. Ha, J.R. Reinfelder et al // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2013. – Vol. 112. – P. 166 – 177.

53. Crompton, P. Assessment of mercury exposure and malaria in a Brazilian Amazon riverine community / P. Crompton, A.M. Ventura, J.M. de Souza et al // Environ Res. – 2002. – Vol. 90(2). – P. 69–75.

54. Dierkes, J. Stable isotope ratios of nitrogen and carbon as biomarkers of a vegan diet / J. Dierkes, S. Dietrich, K. Abraham et al // European Journal of Nutrition. – 2023. – Vol. 62(1). – P. 433–441.

55. Dietz, R. What are the toxicological effects of mercury in Arctic biota? / Dietz, R., Sonne, C., Basu et al. // The Science of the total environment. – 2012. – Vol. 443. – P. 775–790.

56. Díez, S. Determinants of exposure to mercury in hair from inhabitants of the largest mercury mine in the world. / Díez, S., Esbrí, J. M., Tobias, A., et al. // Chemosphere. – 2011. – Vol. 84(5). – P. 571-577.

57. Díez, S. Hair mercury levels in an urban population from southern Italy: fish consumption as a determinant of exposure / S. Díez, P. Montuori, A. Pagano et al // Environment International. – 2008. – Vol. 34. – P.162–167.

58. Du, B. Monthly variations in mercury exposure of school children and adults in an industrial area of southwestern China / B. Du, P. Li, X. Feng et al // *Environ Res.* – 2020. – Vol. 196. – P. 1–10.
59. Dusek, L. Bioaccumulation of mercury in muscle tissue of fish in the Elbe River (Czech Republic): multispecies monitoring study 1991–1996 / L. Dusek, Z. Svobodová, D. Janousková et al // *Ecotoxicol Environ Saf.* – 2005. – Vol. 61(2). – P. 256–267.
60. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food // *Efsa Journal.* – 2018. – Vol. 10 (12). – P. 2985.
61. Ehleringer J.R. Stable isotopes in hair reveal dietary protein sources with links to socioeconomic status and health. J.R. Ehleringer, S. Covarrubias Avalos, B.J. Tipple et al. // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* – 2020. – Vol. 117 (33). – P. 20044-20051.
62. Ekino, S. Minamata disease revisited: an update on the acute and chronic manifestations of methyl mercury poisoning / S. Ekino, M. Susa, T. Ninomiya et al // *Journal of the neurological sciences.* – 2007. – Vol. 262(1-2). P. 131–144.
63. Endo, T. Relationships among Mercury Concentration, and Stable Isotope Ratios of Carbon and Nitrogen in the Scalp Hair of Residents from Seven Countries: Effects of Marine Fish and C4 Plants Consumption / T. Endo, M. Hayasaka, H. Ogasawra et al // *PLoS ONE.* – 2015. – Vol. 10(6). – P.128–149.
64. FAO yearbook, Fishery and Aquaculture Statistics. Section 2. Food balance sheets and fish contribution to protein supply / Food and Agriculture Organization of the United Nations. – New York, 2019. – P. 43–277.
65. Farquhar, G.D. Carbon isotopic discrimination and photosynthesis / G. D. Farquhar, J. R. Ehleringer, K. T. Hubick // *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* – 1989. – Vol. 40. – P. 503–537.
66. Finley, M.L.D. A comparison of mercury biomagnification through lacustrine food webs supporting brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and other salmonid fishes / M.L.D Finley, K.A. Kidd, R.A. Curry, G.L. Lescord et al // *Front Environ Sci.* – 2016. – Vol. 4 – P. 23.

67. Food, Korea. What is methylmercury in food? / Korea Food, Drug Administration. — Seoul: KFDA. — 2007. — P.68.
68. Fujimura, M. Mercury Contamination in Humans in Upper Maroni, French Guiana Between 2004 and 2009 / M. Fujimura, A. Matsuyama, J.-P. Harvard et al // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. — 2011. — Vol. 88(2). — P. 135–139.
69. Fuller, B.T. Nitrogen balance and $\delta^{15}\text{N}$: why you're not what you eat during pregnancy / B.T. Fuller, J.L. Fuller, N.E. Sage et al // *Rapid communications in mass spectrometry*. — 2004. — Vol. 18(23). — P. 2889-2896.
70. Gabriele S. The Stable Isotope Method in Human Paleopathology and Nutritional Stress Analysis / S. Gabriele // *Arch & Anthropol Open Acc.* — 2018. — Vol. 1(5). — P. 1–3.
71. Gardner, R.M. Mercury exposure, serum antinuclear/antinucleolar antibodies, and serum cytokine levels in mining populations in Amazonian Brazil: a cross-sectional study / R.M. Gardner, J.F. Nyland, I.A. Silva et al // *Environ Res.* — 2010. — Vol. 110(4). — P. 345–354.
72. Gerstenberger S. L. Concentrations of blood and hair mercury and serum PCBs in an Ojibwa population that consumes Great Lakes region fish/ Tavis, D. R., Hansen, L. K., Pratt-Shelley, J., & Dellinger, J. A. // *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*. — 1997. — Vol. 35 (4). — P. 377-386.
73. Gibb, H. (2016) Hair mercury concentrations in residents of Sundarban and Calcutta, India / H. Gibb, K.G. O'Leary, S.K. Sarkar et al // *Environ Res.* — Vol. 150. — P. 616–621.
74. Grandjean, P. Developmental neurotoxicity of industrial chemicals / P. Grandjean, P.J. Landrigan // *Lancet*. — 2006. — Vol. 368(9553). — P. 2167–2178.
75. Haines, T.A. Perch mercury content is related to acidity and color of 26 Russian lakes / T.A. Haines, V.T. Komov, V.E. Matey et al // *Water Air Soil Pollut.* — 1995. — Vol. 85. — P. 823–828.
76. Hajeb, P. Hair mercury level of coastal communities in Malaysia: a linkage with fish consumption / P. Hajeb, J. Selamat, A. Ismail et al // *Eur Food Res Technol.* — 2008. — Vol. 227. — P. 1349–1355.

77. Harada, M. The present mercury contents of scalp hair and clinical symptoms in inhabitants of the Minamata area / M. Harada, J. Nakanishi, S. Konuma et al // *Environ Res.* – 1998. – Vol. 77. – P. 160–164.
78. Harkins, D.K. Hair analysis: exploring the state of the science / D.K. Harkins, A.S. Susten // *Environ. Health Perspect.* – 2003. – Vol. 111. – P. 576–578.
79. Hightower, J. M. Mercury levels in highend consumers of fish / J. M. Hightower, D. Moore // *Environmental Health Perspectives.* – 2003. – Vol. 111. – P. 604–608.
80. Hong, Y. S. Methylmercury exposure and health effects / Y.S. Hong, Y.M. Kim, K.E. Lee // *Journal of preventive medicine and public health.* – 2012. – Vol. 45 (6). – P. 353.
81. Horvat, M. Arsenic: biomarkers of exposure and human biomonitoring / M. Horvat, Z. Šlejkovec, I. Falnoga // *Biomarkers and human biomonitoring.* – 2012. – Vol. 1. – P. 418–445.
82. Houston, M.C. Role of Mercury Toxicity in Hypertension, Cardiovascular Disease, and Stroke / Mark C. Houston // *The Journal of Clinical Hypertension.* – 2011. – Vol 13. – № 8. – P. 621–627.
83. Hu, H. Oxidation and methylation of dissolved elemental mercury by anaerobic bacteria / H. Hu, H. Lin, W. Zheng et al // *Nature Geoscience.* – 2013. – Vol. 6(9). – P. 751–754.
- Hu, X. F. Mercury exposure, cardiovascular disease, and mortality: A systematic review and dose-response meta-analysis. / Hu, X. F., Lowe, M., Chan, H. M. // *Environmental research.* – 2021. – Vol. 193. – P. 110538.
84. Huang, Y. Anthropogenic mercury emissions from 1980 to 2012 in China / Y. Huang, M. Deng, T. Li et al // *Environmental Pollution.* – 2017. – Vol. 226. – P. 230–239.
85. Huelsemann, F. Effect of a controlled dietary change on carbon and nitrogen stable isotope ratios of human hair / Huelsemann, F., Flenker, U., Koehler, K. et al // *Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry.* – 2009. –Vol. 23(16). – P. 2448-2454.

86. Huelsemann, F. Human dietary $\delta^{15}\text{N}$ intake: Representative data for principle food items. / Huelsemann, F.; Koehler, K.; Braun, H. et al. // *Am. J. Phys. Anthropol.* – **2013**. – Vol. 152. – P.58–66.
87. Hughes, W.L. A physicochemical rationale for the biological activity of mercury and its compounds / W.L. Hughes // *Ann N Y Acad Sci.* – 1957. – Vol. 65(5). – P. 454–460.
88. Hülsemann, F. Global spatial distributions of nitrogen and carbon stable isotope ratios of modern human hair / F. Hülsemann, C. Lehn, S. Schneiders et al. // *Rapid Commun Mass Spectrometry.* – 2015. – Vol. 29(22). – P. 2111–2121.
89. Human biomonitoring: facts and figures / World Health Organization. Regional Office for Europe // *Human biomonitoring: facts and figures.* – 2015. – P.104. [Электронный ресурс] URL: <https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2015-3209-42967-60040> (дата обращения: 09.07.2025)
90. Iken, K. Food web structure in the high Arctic Canada Basin: evidence from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis / K. Iken, B.A. Bluhm, R. Gradinger // *Polar Biol.* – 2005. – Vol. 28. – P. 238–249.
91. 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 et al // *Environ Geochem Health.* - 2023. - Vol. 45(3). - P. 863–879.
92. Ivanova, E.S. Mercury Content in Tissues of Amphibians of Northwest Russia (Vologda Region) / E.S. Ivanova., V.T. Komov, L.S. Khabarova et al // *Advances in Engineering Research/* – 2020. – Vol. 191. – P. 75 – 79.
93. Jain, R.K. Environmental impacts of mining. / R.K. Jain, Z. Cui, J.K. Domen // *Environmental Impact of Mining and Mineral Processing* Butterworth-Heinemann. – Boston, 2016. – P. 53–157.
94. Joint FAO/WHO Expert Consultation on the Risks and Benefits of Fish Consumption: meeting report, Rome, 9–13 October 2023 / FAO, WHO. – Rome : FAO, WHO, 2024. – 124 p. – (Food safety and quality series ; No. 28). – ISBN 978-92-4-010087-9. – [Электронный ресурс] URL:

<https://www.who.int/publications/i/item/9789240100879> (дата обращения: 04.04.2025).

95. Keller, M.D. 1989. Dimethyl sulfide production in marine phytoplankton / M.D. Keller, W.K. Bellows, R.R.L. Guillard // *Biogenic Sulfur in the Environment*. – 1989. – Vol. 393. – P. 167–182.
96. Khabarova, L.S. Mercury in Tissues of Red Fox as Indicator of Environmental Pollution / L.S. Khabarova, N.Ya. Poddubnaya, A.V. Andreeva et al // *Advances in Engineering Research*. – 2018. – Vol. 177. – P. 96 – 100.
97. Kim, D.S. A study on exposure and health effect of mercury (II) Incheon / D.S. Kim, G.B. Kim, K.H. Park et al. // *National Institute of Environmental Research*. – 2006. – P. 1–115.
98. Kinsey, J.S. 2004. Characterization of the fugitive mercury emissions at a chlor-alkali plant: overall study design / J.S. Kinsey, F.R. Anscombe, S.E. Lindberg et al // *Atmos. Environ.* – 2004. – Vol. 38. – P. 633–641.
99. Kruzikova, K. Using human hair as an indicator for exposure to mercury / K. Kruzikova, R. Kensova, J. Blahova et al // *Neuroendocrinology Letters*. – 2009. – Vol. 30 (1). – P. 177–81.
100. Kurland, L.T. Minamata disease. The outbreak of a neurologic disorder in Minamata, Japan, and its relationship to the ingestion of seafood contaminated by mercuric compounds / L.T. Kurland, S.N. Faro, H. Siedler // *World Neurology*. – 1960. – Vol. 1, No. 5. – P. 370–395.
101. Kusaka, S. (2016). Homogeneous diet of contemporary Japanese inferred from stable isotope ratios of hair / S. Kusaka, E. Ishimaru, F. Hyodo et al // *Scientific reports*. – 2016. – Vol. 6(1). – P. 1–11.
102. L'Hérault, V. Discrimination factors of carbon and nitrogen stable isotopes from diet to hair in captive large Arctic carnivores of conservation concern / V. L'Hérault, N. Lecomte, M.H. Truchon et al // *Rapid Commun Mass Spectrom.* - 2018. - Vol. 32(20). - P. 1773–1780.

103. Lavoie, R.A. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a worldwide meta-analysis / R.A. Lavoie, T.D. Jardine, M.M. Chumchal et al // *Environ Sci Technol.* – 2013. – Vol. 47(23). – P. 13385–13394.
104. Lee, C. Food safety guidelines for consumer / C. Lee, S.D. Cho, D.S. Chang et al // *Safe Food.* – 2006. – Vol. 1(4). – P. 31–43.
105. Lehn, C. Provenancing of unidentified corpses by stable isotope techniques—presentation of case studies / C. Lehn, A. Rossmann, M. Graw // *Sci Justice.* - 2015. - Vol. 55(1). - P. 72–88.
106. Li, P. Methylmercury exposure and health effects from rice and fish consumption: a review / P. Li, X. Feng, G. Qiu // *Int J Environ Res Public Health.* – 2010. – Vol. 7. –P. 2666–2691.
107. Li, Y.B. Progress in the study of mercury methylation and demethylation in aquatic environments / Y.B. Li, Y. Cai // *Chin Sci Bull.* – 2013. – Vol. 58. – P. 177–185.
108. Lin, C. J. The chemistry of atmospheric mercury: a review / C.J. Lin, S.O. Pehkonen // *Atmospheric environment.* – 1999. – T. 33. – №. 13. – C. 2067–2079.
109. Lindow, S.W. Maternal and neonatal hair mercury concentrations: the effect of dental amalgam / S.W. Lindow, R. Knight, J. Batty et al // *Journal of Obstetrics and Gynaecology.* – 2003. – Vol. 23 (1). – P. S48-S49.
110. Liu, X. Mercury concentration in hair samples from Chinese people in coastal cities / X. Liu, J. Cheng, S. Yuling et al // *J Environ Sci (China).* – 2008. – Vol. 20. – P. 1258–1262.
111. Macko, S. A. (1999). Documenting the diet in ancient human populations through stable isotope analysis of hair / S.A. Macko, M.H. Engel, V. Andrusevich et al // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences.* – 1999. – Vol. 354(1379). – P. 65–76.
112. Marcinek-Jacel, M. The impact of demographic factors, behaviors and environmental exposure to mercury content in the hair of the population living in the region of Lodz (central Poland) / M. Marcinek-Jacel, J. Albińska, A. Pawlaczyk et al // *Environ Toxicol Pharmacol.* – 2017. – Vol. 55. – P. 196-201.

113. Martinelli, L.A. Worldwide stable carbon and nitrogen isotopes of Big Mac® patties: An example of a truly “glocal” food / L.A. Martinelli, G.B. Nardoto, L.A. Chesson, L. A. et al // Food Chemistry. – 2011. – Vol. 127(4). – P. 1712–1718.
114. Masih, A. Exposure profiles of mercury in human hair at a terai belt of North India / A. Masih, A. Taneja, R. Singhvi // Environ Geochem Health. – 2016. – Vol. 38. – P. 145–156.
115. Minagawa M. Reconstruction of human diet from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in contemporary Japanese hair: a stochastic method for estimating multi-source contribution by double isotopic tracers //Applied geochemistry. – 1992. – Vol. 7 (2). – P. 145-158.
116. Morel, F.M. The chemical cycle and bioaccumulation of mercury / F.M. Morel, A.M. Kraepiel, M. Amyot // Annual review of ecology and systematics. – 1998. – Vol. 29 (1). – P. 543–566.
117. Mozaffarian, D. Fish intake, contaminants, and human health: evaluating the risks and the benefits / D. Mozaffarian, E.B. Rimm // JAMA. – 2006. – Vol. 296(15). – P. 1885–1899.
118. Myers, G.J. Nutrient and methyl mercury exposure from consuming fish / G.J. Myers, P.W. Davidson, J.J. Strain // J. Nutr. – 2007. – Vol. 137. – P. 2805–2808.
119. Nakamura K. Geographical variations in the carbon isotope composition of the diet and hair in contemporary man / Nakamura K. Schoeller, D. A., Winkler, F. J., & Schmidt, H. L //Biomedical mass spectrometry. – 1982. – Vol. 9 (9). – P. 390-394.
120. Nash, S. H. Stable Nitrogen and Carbon Isotope Ratios Indicate Traditional and Market Food Intake in an Indigenous Circumpolar Population / Nash, S. H., Bersamin, A., Kristal, A. R., et al. // The Journal of nutrition. – 2012. –Vol.142(1). – P. 84-90.
121. National Research Council (NRC). Toxicological effects of methylmercury. / Washington (DC): National Academies Press (US) – 2000.
122. Nemova, N. The effect of mercury and acidity on biochemical indices of freshwater fish / N. Nemova, E. Kaivarainen, M. Krupnova et al // The Biological Essentiality of Macro and Trace Elements. – 2000. – P. 814–818.

123. O'Connell, T.C. Isotopic comparison of hair, nail and bone: modern analysis / T.C. O'Connell, R.E.M. Hedges, M.A. Healey et al // *J Archaeol Sci.* - 2001. - Vol. 28(11). - P. 1247–1255.
124. Okati, N. Hair mercury and risk assessment for consumption of contaminated seafood in residents from the coast of the Persian Gulf, Iran / N. Okati, A. Esmaili-sari // *Environ Sci Pollut Res.* – 2018. – Vol. 25. – P. 639.
125. Okati, N. Hair Mercury Concentrations of Lactating Mothers and Breastfed Infants in Iran (Fish Consumption and Mercury Exposure) / N. Okati, A.E. Sari, S.M. Ghasempouri // *Biol Trace Elem Res.* – 2012. – Vol. 149. – P. 155–162.
126. Olivero, J. Human exposure to mercury in San Jorge River basin, Colombia (South America) / J. Olivero, B. Johnson, E. Arguello // *Sci Total Environ.* – 2002. – Vol. 289. – P. 41–47.
127. Olivero-Verbel, J. Human exposure and risk assessment associated with mercury pollution in the Caqueta River, Colombian Amazon / J. Olivero-Verbel, L. Carranza-Lopez, K. Caballero-Gallardo et al // *Environ Sci Pollut Res.* – 2016. – Vol. 23. – P. 20761–20771.
128. Olivero-Verbel, J. Relationship between localization of gold mining areas and hair mercury levels in people from Bolivar, north of Colombia / J. Olivero-Verbel, K. Caballero-Gallardo, J. Marrugo Negrete // *Biol Trace Elem Res.* – 2011. – Vol. 144(1-3). – P. 118–132.
129. Petrova, M.V. Human mercury exposure levels and fish consumption at the French Riviera / M.V. Petrova, M. Ourgaud, J.R.H. Boavida et al // *Chemosphere.* – 2020. – Vol. 258. – P. 127–232.
130. Petzke K. J. Choice of dietary protein of vegetarians and omnivores is reflected in their hair protein ^{13}C and ^{15}N abundance/ Petzke K. J., Boeing H., Metges C. // *Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry.* – 2005. – Vol. 19. – №. 11. – P. 1392-1400.
131. Petzke, K. J. Nitrogen isotopic composition in hair protein is different in liver cirrhotic patients. / Petzke, K. J., Feist, T., Fleig, W. E., & Metges, C. C. // *Rapid*

Communications in Mass Spectrometry. An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry. – 2006. – Vol/20(19). P. 2973-2978.

132. Petzke, K. J. Stable isotope ratio analysis in human hair / K.J. Petzke, B.T. Fuller // Handbook of hair in health and disease. – Wageningen Academic, 2011. – P. 332–351.

133. Procedures for preparation of food balance sheets: electronic resource // Food balance sheets. A handbook. – Rome, 2001. – URL: https://www.fao.org/4/X9892E/X9892e03.htm#P531_50359 (дата обращения: 03.03.2025).

134. Ratelle, M.S. Human biomonitoring of metals in sub-Arctic Dene communities of the Northwest Territories / M. Ratelle, S. Packull-McCormick et al // Canada Environ. Res. – 2020. – Vol. 190. – P. 1–11.

135. Reitsema L. J. Laboratory and field methods for stable isotope analysis in human biology / L.J. Reitsema // American Journal of Human Biology. – 2015. – Vol. 27 (5). – P. 593–604.

136. Renzoni, A. Mercury levels along the food chain and risk for exposed populations/ A. Renzoni, F. Zino, E. Franchi // Environ. Res. – 1998. – Vol. 77. – P. 68–72.

137. Rice, G. E. Mercury study report to Congress. Volume 3. Fate and transport of mercury in the environment / Rice, G. E. Ambrose, R. B., Bullock, O. R., Swartout, J.// (No. PB-98-124753/XAB; EPA-452/R-97/005). Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC (United States). Office of Air Quality Planning and Standards. – 1997. – P.195.

138. Ripley, S. Blood and hair mercury concentrations among Cree First Nations of Eeyou Istchee (Quebec, Canada): time trends, prenatal exposure and links to local fish consumption / S. Ripley, E. Robinson, L. Johnson-Down et al // International Journal of Circumpolar Health. – 2018. – Vol. 77. – P. 1–9.

139. Rodier P.M., Developing brain as a target of toxicity / P.M. Rodier // Environmental Health Perspectives. – 1995/ – Vol. 103. – P. 73–76.

140. Rose, M. Contamination of fish in UK fresh water systems: risk assessment for human consumption / M. Rose, A. Fernandes, D. Mortimer et al // *Chemosphere*. - 2015. - Vol. 122. - P. 183–189.
141. Roy, D.M. Using stable isotope analysis to obtain dietary profiles from old hair: A case study from Plains Indians / D.M. Roy, R. Hall, A.C. Mix et al // *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*. – 2005. – Vol. 128(2). – P. 444–452.
142. Rundgren, S. Mercury in Soil: distribution, speciation and biological effects / S. Rundgren, Å. Rühling, K. Schlüter et al // Council of Ministers, 1992. – 92 p.
143. Sakamoto, M. High exposure of Chinese mercury mine workers to elemental mercury vapor and increased methylmercury levels in their hair / M. Sakamoto, X. Feng, P. Li et al // *Environmental health and preventive medicine*. – 2007. – Vol. 12. – №. 2. – P. 66-70.
144. Salonen, J.T. Intake of mercury from fish, lipid peroxidation, and the risk of myocardial infarction and coronary, cardiovascular, and any death in eastern Finnish men / J.T. Salonen, K. Seppanen, K. Nyyssonen et al // *Circulation*. - 1995. - Vol. 91. - P. 645–655.
145. Salonen, J.T. Mercury accumulation and accelerated progression of carotid atherosclerosis: a population based prospective 4-year follow-up study in men in eastern Finland / J.T. Salonen, K. Seppanen, T.A. Lakka et al // *Atherosclerosis*. - 2000. - Vol. 148. - P. 265–273.
146. Santos-Lima, C.D. Neuropsychological Effects of Mercury Exposure in Children and Adolescents of the Amazon Region, Brazil / C.D. Santos-Lima, D.S. Mourão, C.F. Carvalho et al // *Neurotoxicology*. – 2020. – Vol. 79. – P. 48–57.
147. Schaefer, A. M. Mercury concentrations in Atlantic bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) inhabiting the Indian River Lagoon, Florida: Patterns of spatial and temporal distribution / A.M. Schaefer, E. M., Titcomb, P.A. Fair et al // *Marine Pollution Bulletin*. – 2015. – Vol. 97(1-2). – P. 544-547.
148. Schoeninger, M. J. Bone stable isotope studies in archaeology / M.J. Schoeninger, K. Moore // *Journal of World Prehistory*. – 1992. – T. 6. – №. 2. – C. 247–296

149. Schoeninger, M.J. Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals / M.J. Schoeninger, M.J. DeNiro // *Geochim Cosmochim Acta*. – 1984. – Vol. 48(4). – P. 625–639.
150. Schroeder, W.H. Atmospheric mercury: an overview / W.H. Schroeder, J. Munthe // *Atmospheric environment*. – 1998. – Vol. 32 (5). – P. 809–822.
151. Selin, N.E. Global biogeochemical cycling of mercury: a review // *Annual review of environment and resources*. – 2009. – Vol. 34. – P. 43–63.
152. Shah, A.Q. A population assessment of mercury exposure from two cities of Pakistan with respect to freshwater and marine fish consumption / A.Q. Shah, T.G. Kazi, H.I. Afridi et al // *Toxicology and Industrial Health*. – 2016. – Vol. 32 (6). – P. 1033–1041.
153. Shao, D. Hair mercury levels and food consumption in residents from the Pearl River Delta: South China / D. Shao, Y. Kang, Z. Cheng et al // *Food chemistry*. – 2013. – Vol. 136(2). – P. 682–688.
154. Sheehan, M.C. Global methylmercury exposure from seafood consumption and risk of developmental neurotoxicity: a systematic review / J.T. Salonen, K. Seppanen, K. Nyssonen et al // *Bull. World Health Organ*. – 2014. – Vol. 92. – P. 254–269.
155. Sokal, R.R. Biometry. The principals and practice of Statistics in biological research / R.R. Sokal, F.J. Rohlf // N.Y.: W.Y. Freeman and Company, 1995. – P.887.
156. Sponheimer, M. An experimental study of carbon-isotope fractionation between diet, hair, and feces of mammalian herbivores. / Sponheimer, M., Robinson, T., Ayliffe, L. et al. / *Canadian Journal of Zoology*. – 2003. – Vol. 81(5). – P. 871–876.
157. Sprovieri, F. Atmospheric mercury concentrations observed at ground-based monitoring sites globally distributed in the framework of the GMOS network, Atmos / F. Sprovieri, N. Pirrone, M. Bencardino et al // *Chem. Phys*. – 2016 – Vol. 16. – P. 11915–11935.
158. Sprovieri, F. Five-year records of mercury wet deposition flux at GMOS sites in the Northern and Southern hemispheres, Atmos / F. Sprovieri, N. Pirrone, M. Bencardino et al // *Chem. Phys*. – 2017 – Vol. 17. – P. 2689–2708.

159. Spry, D.J. Metal bioavailability and toxicity to fish in low-alkalinity lakes: a critical review / D.J. Spry, J.G. Wiener // *Environ. Pollut.* – 1991. – Vol. 71. – P. 243–304.
160. Spyker, D.A. Response model analysis for cross-fostering studies: prenatal versus postnatal effects on offspring exposed to methylmercury dicyandiamide / D.A. Spyker, J.M. Spyker // *Toxicol Appl Pharmacol.* – 1977. – Vol. 40(3). – P. 511–527.
161. Steinberg, C.E.W. Ecology of humic substances in freshwater / C.E.W. Steinberg. – Berlin-Heidelberg. NY: Springer-Verlag. – 2003. – P.440.
162. Sundseth, K. Global sources and pathways of mercury in the context of human health / K. Sundseth, J.M. Pacyna, E.G. Pacyna et al // *Int J Environ Res Public Health.* – 2017. – Vol. 14(1). – P. 1–14.
163. Szpak, P. Complexities of nitrogen isotope biogeochemistry in plant-soil systems: implications for the study of ancient agricultural and animal management practices / P. Szpak // *Frontiers in plant science.* – 2014. – Vol. 5. – P. 1-19.
164. Tong, Y. Mercury concentrations in China's coastal waters and implications for fish consumption by vulnerable populations / Y. Tong, M. Wang, X. Bu et al // *Environ Pollut.* – 2017. – Vol. 231. – P. 396–405.
165. Trasande, L. Public health and economic consequences of methylmercury toxicity to the developing brain / L. Trasande, P.J. Landrigan, C. Schechter // *Environ Health Perspect.* – 2005. – Vol. 113(5). – P. 590–596.
166. Travnikov, O. Multi-model study of mercury dispersion in the atmosphere: atmospheric processes and model evaluation, *Atmos* / O. Travnikov, H. Angot, P. Artaxo et al // *Chem. Phys.* - 2017 - Vol. 17. - P. 5271–5295.
167. U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). Mercury Update: Impact on Fish Advisories – Washington, D.C. – 2001. – P.66. [Электронный ресурс] URL: <https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2019-04/documents/mercury-update-impact-fish-advisories-2001.pdf> (дата обращения: 26.04.2024)
168. UNEP. Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport. UNEP Chemicals Branch. – Geneva, Switzerland 44pp. [Электронный ресурс] URL: <https://www.amap.no/documents/doc/global-mercury-assessment-2013-sources-emissions-releases-and-environmental-transport/847>.

169. UNEP. Global Mercury Assessment 2018/ UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva Switzerland, 2019. – 62 p. ISBN:978-92-807-3744-8.
170. UNEP. United Nations Environment Programme (UNEP). The global atmospheric mercury assessment: sources, emissions and transport. – Geneva: United Nations Environment Programme, 2008. – P. 13–62.
171. UNEP/WHO. Guidance for Identifying Populations at Risk from Mercury Exposure. Geneva: UNEP, WHO, 2008. – 167 p. [Электронный ресурс] URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241596572> (дата обращения: 10.10.2025).
172. UNIDO. Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by Artisanal and Small-Scale Gold Miners. / UNIDO – Vienna, 2008. – P. 208.
173. US EPA (2010) Guidance for Implementing the January 2001 Methylmercury Water Quality Criterion. EPA 823-R-10-001. / US EPA. –Washington, DC. Office of Water. – 2010. – P. 221.
174. Valenzuela, L.O. (2012) Dietary heterogeneity among western industrialized countries reflected in the stable isotope ratios of human hair / L.O. Valenzuela, L.A. Chesson, G.J. Bowen et al // PLoS ONE. - 2012. - Vol. 7(3). - P.1–8.
175. Valenzuela, L.O. Spatial distributions of carbon, nitrogen and sulfur isotope ratios in human hair across the central United States / L.O. Valenzuela, L.A. Chesson, S.P. O’Grady et al // Rapid Commun Mass Spectrom. - 2011. - Vol. 25. - P. 861–868.
176. Vega, C.M. Human Mercury Exposure in Yanomami Indigenous Villages from the Brazilian Amazon / C.M. Vega, J.D.Y. Orellana, M.W. Oliveira et al // Int J Environ Res Public Health. – 2018. – Vol. 15(6) – P. 1–13
177. Veiga, M.M. Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining. / M.M. Veiga, P.A. Maxson, L.D. Hylander // J. Clean. Prod. - 2006. - Vol. 14. - P. 436–447.
178. Virtanen, J.K. Mercury, fish oils, and risk of acute coronary events and cardiovascular disease, coronary heart disease, and all-cause mortality in men in eastern

- Finland / J.K. Virtanen, S. Voutilainen, T.H. Rissanen et al // *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* – 2005. – Vol. 25(1). – P. 228–233.
179. Walker, E.V. Patterns of fish and whale consumption in relation to methylmercury in hair among residents of Western Canadian Arctic communities / E.V. Walker, Y. Yuan, S. Girgis et al // *BMC Public Health.* – 2020. – Vol. 20. – P. 1–13.
180. White, T. D. Human osteology / M.T. Black, P.A. Folkens ; 3d edition // Academic Press, 2012. – 689 p. ISBN: 9780080920856.
181. Williams, J.R. Medical Ethics Manual. 3rd edition / Williams J.R. // Ferney – Voltaire: World Medical Association, 2015. – 134 p.
182. Wilson, A.S. Stable isotope and DNA evidence for ritual sequences in Inca child sacrifice / A.S. Wilson, T. Taylor, M.C. Ceruti, et al // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* – 2007. – Vol. 104 (42). – P. 16456-16461.
183. Winfrey, M.R. Environmental factors affecting the formation of methylmercury in low pH lakes: A review / M.R. Winfrey, J.W.M. Rudd // *Environ. Toxicol. Chem.* – 1990. – Vol. 9. – P. 853–869.
184. World Health Organization (WHO). Environmental Health Criteria 1: Mercury, Geneva Health Organization. – 1976. – P.131
185. World Health Organization (WHO). Environmental Health Criteria 101: Methylmercury. International Programme of Chemical Safety //World Health Organization, Geneva, Switzerland. – 1990. – P. 144.
186. World Health Organization (WHO). Exposure to mercury: a major public health concern //WHO, Public Health Environment International. – 2007. – P.4
187. World Health Organization (WHO). Global and regional food consumption patterns and trends /WHO Technical Report Series. – 2009. – Vol. 916. – P. 1-17.
188. World Health Organization (WHO). Health Protection of the Elderly and the Aged and the Prevention of Premature Aging / WHO, Regional Office for Europe //Report on the Seminar, Kiev. – 1963. – P. 14-22.
189. Wu, Y. A Study on Hair Mercury Levels of University Students / Y. Wu, J. Xue, C. Zhang et al // *Bull Environ Contam Toxicol.* – 2020. – Vol.106 (1). – P. 160–164

190. Yan, J. Methylmercury Monitoring Study in Karakuwacho Peninsula Area in Japan / J. Yan, K. Inoue, A. Asakawa et al // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. – 2014. – Vol. 93(1). – P. 36–41.
191. Yasutake, A. Current hair mercury levels in Japanese for estimation of methylmercury exposure / A. Yasutake, M. Matsumoto, M. Yamaguchi et al // J Health Sci. - 2004. - Vol. 50. - P. 120–125.
192. Yasutake, A. Current hair mercury levels in Japanese: survey in five districts / A. Yasutake, M. Matsumoto, M. Yamaguchi et al // Tohoku Journal of Experimental Medicine. – 2003. – Vol. 19. – P. 161–169.
193. Yorifuji, T. Long-term exposure to methylmercury and psychiatric symptoms in residents of Minamata, Japan / T. Yorifuji, T. Tsuda, S. Inoue et al. // Environment international. – 2011. – Vol. 37(5). – P. 907–913.
194. Yoshizawa, K. Mercury and the risk of coronary heart disease in men / K. Yoshizawa, E.B. Rimm, J.S. Morris et al // N Engl J Med. - 2002. - Vol. 347. - P. 1755–1760.
195. Zhang, L. A review of current knowledge concerning dry deposition of atmospheric mercury / L. Zhang, L.P. Wright, P. Blanchard // Atmos. Environ. - 2009. - Vol. 43. - P. 5853-5864.