

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ВОЛОС НАСЕЛЕНИЯ ВОЛОГДСКОЙ ОБЛАСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ПРОЖИВАНИЯ И ПИТАНИЯ

© 2021

Иванова Е.С.¹, Румянцева О.Ю.¹, Заверткина А.С.¹, Буева А.Е.¹, Елизарова А.С.²

¹Череповецкий государственный университет (г. Череповец, Вологодская область, Российская Федерация)

²Муниципальное унитарное предприятие города Череповца «Водоканал»

(г. Череповец, Вологодская область, Российская Федерация)

Аннотация. С помощью методов изотопной масс-спектрометрии возможно изучение изменения изотопного состава организмов в пищевой цепи – трофического фракционирования. В том числе с помощью изотопного анализа тканей можно установить тип питания и возможное место проживания человека, что помогает в решении задач судебной экспертизы. В данном исследовании определен изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах жителей промышленного города Череповца и удаленного от промышленных источников загрязнения Кирилловского района Вологодской области. Определение изотопного состава волос проводилось на изотопном масс-спектрометре Thermo-Finnigan Delta V Plus в эколого-аналитической лаборатории Череповецкого государственного университета. Установлены средние значения изотопов $\delta^{13}\text{C}$ ($-20,86\text{‰}$) и $\delta^{15}\text{N}$ ($9,98\text{‰}$) в волосах участников исследования. Обнаружены различия в значениях изотопов углерода и азота в волосах жителей г. Череповца и Кирилловского района. Статистически значимых различий в изотопном составе $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах женщин и мужчин не обнаружено. Установлены различия по $\delta^{15}\text{N}$ в волосах людей, употребляющих разное количество рыбы (у тех, кто употребляет рыбу чаще, соотношение $\delta^{15}\text{N}$ выше).

Ключевые слова: волосы людей; стабильные изотопы; изотопный анализ; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; трофическое фракционирование; Вологодская область; город Череповец; Кирилловский район; рацион питания.

THE ISOTOPIC COMPOSITION OF HAIR AMONG THE POPULATION IN THE VOLOGDA REGION DEPENDING ON THE CONDITIONS OF LIVING AND NUTRITION

© 2021

Ivanova E.S.¹, Rumiantseva O.Yu.¹, Zavertkina A.S.¹, Bueva A.E.¹, Elizarova A.S.²

¹Cherepovets State University (Cherepovets, Vologda Region, Russian Federation)

²«Vodokanal» Municipal Unitary Enterprise of Cherepovets city (Cherepovets, Vologda Region, Russian Federation)

Abstract. Isotope mass spectrometry methods are used to study changes in the isotopic composition of organisms in the food chain called trophic fractionation. In particular, with the help of isotope analysis of tissues, it is possible to determine the type of nutrition and possible place of residence of a person, which helps in solving the tasks of forensic examination. In this study, the isotopic composition $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the hair of residents of the industrial city of Cherepovets and the Kirillovsky District of the Vologda Region, remote from industrial sources of pollution, was determined. The determination of the isotopic composition of hair was carried out on an isotope mass spectrometer Thermo-Finnigan Delta V Plus in the Ecological and Analytical Laboratory of Cherepovets State University. The average values of isotopes in the hair of the study participants are $-20,86\text{‰}$ ($\delta^{13}\text{C}$) and $9,98\text{‰}$ ($\delta^{15}\text{N}$). There are differences in the ratio of carbon and nitrogen isotopes in the hair of residents of Cherepovets and Kirillovsky District. There are not statistically significant differences in the isotopic composition of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the hair of female and male. There are differences of $\delta^{15}\text{N}$ in the hair of people who consume different amounts of fish (people who consume fish more often have a higher ratio of $\delta^{15}\text{N}$).

Keywords: human hair; stable isotopes; isotopic analysis; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; trophic fractionation; Vologda Region; Cherepovets; Kirillovsky District; food ration.

Введение

Изотопный анализ – это современный метод анализа, позволяющий выявлять закономерности миграции различных веществ в экосистемах. С помощью методов изотопной масс-спектрометрии возможно изучение изменения изотопного состава организмов в пищевой цепи – трофического фракционирования [1, р. 92]. Для экологических исследований наибольшее значение имеют процессы фракционирования изотопов углерода при фотосинтезе и процесс накопления тяжелых изотопов азота в трофических цепях [2, с. 476–477]. Содержание тяжелого изотопа

$\delta^{15}\text{N}$ увеличивается примерно на 2‰ на каждом следующем трофическом уровне [3, р. 595, fig. 2]. Содержание тяжелого изотопа ^{15}N в организме человека зависит от его пищевых предпочтений, а также и от физического состояния: повышается при беременности [4, р. 2891, fig. 1: b], при недоедании и голодании [5, р. 25; 6, р. 1607]. Соотношение изотопов углерода в живых организмах зависит от типа фотосинтеза растений. С помощью изотопного анализа тканей можно установить, какими растениями питался человек: С3-растениями (пшеница, рис, картофель) или С4-растениями (кукуруза) [7, р. 330–331].

C3-растения при фотосинтезе включают в свои ткани преимущественно легкий изотоп ^{12}C , а C4-растения обогащены тяжелым изотопом ^{13}C [8, р. 255–256]. Однако трофическое фракционирование изотопов углерода в среднем составляет около 0,5–1‰, поэтому реже используется для определения трофического уровня [9, р. 382]. Изучение соотношений изотопов углерода и азота может использоваться для оценки рациона не только современных людей, но и прошлых цивилизаций [10, р. 172]. Значения $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{15}\text{N}$ в волосах людей может значительно различаться от места проживания. Например, жители Юго-Восточной Азии, употребляющие преимущественно рис, отличаются от жителей Латинской Америки, где диета основана на кукурузе [11, р. 11]. Принимая во внимание эти сведения, а также тот факт, что значения изотопов кислорода в питьевой воде определяются географическим положением [12, р. 4, fig. 1], ученые изучают содержание $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ в волосах людей [13, р. 2119; 14, р. 866] для судебной экспертизы [15, р. 86]. Тем не менее необходимы дополнительные исследования для изучения изотопного состава волос внутри географических регионов [11, р. 1].

Цель исследования: определение соотношения изотопов $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах жителей промышленного города Череповца и удаленного от промышленных источников загрязнения Кирилловского района Вологодской области.

Объектом нашего исследования являются волосы жителей города Череповца и Кирилловского района Вологодской области.

Материалы и методика исследований

Сбор образцов волос для изотопного анализа осуществлялся в 2019 году у жителей города Череповца (59°08' с.ш., 37°55' в.д.) и Кирилловского района (59°52' с.ш., 38°23' в.д.) Вологодской области. Город Череповец – это промышленный центр Северо-Западного федерального округа РФ, в котором располагаются крупные предприятия металлургической и химической промышленности. Кирилловский район расположен в 100 км северо-восточнее г. Череповца (рис. 1).

Значения изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и азота ($\delta^{15}\text{N}$) в волосах были определены у 174 людей (130 – в г. Череповец; 44 – в Кирилловском районе). Все участники дали письменное согласие на проведение экспериментов с участием человека [16, р. 105]. Для изотопного анализа был взят примерно 1 грамм волос из каждого образца. Перед анализом волосы измельчались. Затем пробы волос были промыты в растворе хлороформ – метанол (2:1) для удаления липидов [17, р. 1249] и помещены в ультразвуковую ванну на 40 минут. Далее осуществлялось центрифугирование минимум 3 раза. После промывки пробы были помещены в лиофильную сушку на 2 суток. После сушки образцы волос взвешивали на весах в оловянных стаканчиках, масса навески составляла от 297 до 363 мкг. Определение изотопного состава проводили в 2-кратной повторности на изотопном масс-спектрометре Thermo-Finnigan Delta V Plus эколого-аналитической лаборатории ЧГУ. Изотопный состав выражается в тысячных долях отклонения от международного стандарта, δ (‰):

$$\delta E^n = [(R_{\text{проба}} - R_{\text{стандарт}}) / R_{\text{стандарт}}] \times 1000,$$

где E – элемент (C или N), n – атомарная масса более тяжелого изотопа, R – молярное соотношение тяжелого и легкого изотопов, относительное обилие этого изотопа в анализируемой пробе и в стандарте [2, с. 476–477].

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Statistica. Изучаемая выборка была распределена ненормально, поэтому использовали Mann–Whitney U-test и коэффициент Спирмена при $p < 0,05$.

Результаты исследований и их обсуждение

В ходе анализа полученных значений изотопов углерода и азота в волосах участников исследования было установлено, что среднее значение $\delta^{13}\text{C}$ составляет $-20,86\%$ (табл. 1), что сопоставимо с результатами Северной Германии ($-20,90\%$) [15, р. 76, tabl. 1]; Пакистана ($-20,60\%$) [18, р. 443, tabl. 1]. Полученные данные меньше результатов Мексики ($-15,60\%$) [11, р. 11, tabl. 3]; Колумбии ($-16,80\%$) [19, tabl. 5]. Среднее значение $\delta^{15}\text{N}$ в исследуемой выборке – $9,98\%$ (табл. 1), что сопоставимо с $\delta^{15}\text{N}$ в Монголии ($9,60\%$) [18, р. 443, tabl. 1] и выше, чем в Китае ($8,10\%$) [18, р. 443, tabl. 1].

Установлены статистически значимые различия в изотопном составе $\delta^{13}\text{C}$ в волосах жителей г. Череповца и Кирилловского района (табл. 2). Среднее значение изотопов углерода в волосах жителей г. Череповца сопоставимо с данными Пакистана ($-20,60\%$) [18, р. 443, tabl. 1]. Среднее значение изотопов углерода в волосах жителей Кирилловского района сопоставимо с данными Великобритании ($-21,30\%$) [15, р. 76, tabl. 1]. Обнаружены статистически значимые различия в $\delta^{15}\text{N}$ в волосах жителей г. Череповца и Кирилловского района (табл. 3). Среднее значение изотопов азота в волосах жителей г. Череповца сопоставимо с данными Колумбии ($9,90\%$) [19, tabl. 5]. В волосах жителей Кирилловского района $\delta^{15}\text{N}$ выше, чем в Италии ($8,40\%$) [15, р. 76, tabl. 1].

Не обнаружено статистически значимых различий между $\delta^{13}\text{C}$, а также $\delta^{15}\text{N}$ в волосах женщин и мужчин (табл. 4, 5).

Установлены статистически значимые различия в $\delta^{15}\text{N}$ в волосах людей, употреблявших разное количество рыбы ($p = 0,002$) (табл. 6), что подтверждает тот факт, что при переходе на каждый трофический уровень значение $\delta^{15}\text{N}$ в организме увеличивается [3, р. 595, fig. 2].

Выводы

1. Установлены различия в изотопном составе углерода $\delta^{13}\text{C}$ и азота $\delta^{15}\text{N}$ в волосах жителей г. Череповца и Кирилловского района, что обусловлено разным рационом питания людей различного социально-экономического уровня.

2. Статистически значимых различий в $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в волосах женщин и мужчин не обнаружено.

3. Установлены различия по $\delta^{15}\text{N}$ в волосах людей, употребляющих разное количество рыбы (у тех, кто употребляет рыбу чаще, содержание $\delta^{15}\text{N}$ выше).



Рисунок 1 – Город Череповец и Кирилловский район Вологодской области

Таблица 1 – Изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ и азота $\delta^{15}\text{N}$ в волосах участников исследования, ‰

	n	Среднее	Медиана	Min	Max	Стандартное отклонение	Ошибка среднего
$\delta^{13}\text{C}$, ‰	174	-20,86	-20,78	-22,70	-19,14	0,62	0,047
$\delta^{15}\text{N}$, ‰	174	9,98	9,97	8,97	1,11	0,43	0,033

Таблица 2 – Изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ в волосах жителей г. Череповца и Кирилловского района, ‰

	n	Среднее	Медиана	Min	Max	Стандартное отклонение	Ошибка среднего	MU-тест	p value
г. Череповец	130	-20,67	-20,62	-21,90	-19,14	0,48	0,04	a	0,000
Кирилловский район	44	-21,44	-21,45	-22,70	-20,12	0,63	0,10	b	

Таблица 3 – Изотопный состав азота $\delta^{15}\text{N}$ в волосах жителей г. Череповца и Кирилловского района, ‰

	n	Среднее	Медиана	Min	Max	Стандартное отклонение	Ошибка среднего	MU-тест	p value
г. Череповец	130	9,93	9,91	8,97	11,11	0,42	0,04	a	0,002
Кирилловский район	44	10,14	10,13	9,02	10,91	0,44	0,07	b	

Таблица 4 – Изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ в волосах женщин и мужчин, ‰

	n	Среднее	Медиана	Min	Max	Стандартное отклонение	Ошибка среднего	MU-тест	p value
Мужчины	17	-21,12	-21,09	-22,39	-19,14	0,84	0,20	a	0,009
Женщины	157	-20,84	-20,77	-22,70	-19,62	0,59	0,05	a	

Таблица 5 – Изотопный состав азота $\delta^{15}\text{N}$ в волосах женщин и мужчин, ‰

	n	Среднее	Медиана	Min	Max	Стандартное отклонение	Ошибка среднего	MU-тест	p value
Мужчины	17	9,95	9,96	9,27	10,91	0,43	0,12	a	0,670
Женщины	157	9,99	9,98	8,97	11,11	0,43	0,03	a	

Таблица 6 – Изотопный состав азота $\delta^{15}\text{N}$ у людей с разным количеством рыбы в рационе питания, ‰

Потребление рыбы	n	Среднее	Медиана	Min	Max	Стандартное отклонение	Ошибка среднего	MU-тест	p value
Несколько раз в неделю	52	10,146	10,107	9,391	10,995	0,429	0,059	a	0,002
1–2 раза в месяц	122	9,911	9,888	8,967	11,113	0,413	0,037	b	

Список литературы:

- Martínez del Río C., Wolf N., Carleton S.A., Gannes L.Z. Isotopic ecology ten years after a call for more laboratory experiments // *Biological Reviews*. 2009. Vol. 84, iss. 1. P. 91–111. DOI: 10.1111/j.1469-185X.2008.00064.x.
- Тиунов А.В. Стабильные изотопы углерода и азота в почвенно-экологических исследованиях // *Известия РАН. Серия биологическая*. 2007. № 4. С. 475–489.
- Reitsema L.J. Laboratory and field methods for stable isotope analysis in human biology // *American Journal of Human Biology*. 2015. Vol. 27, iss. 5. P. 593–604. DOI: 10.1002/ajhb.22754.
- Fuller B.T., Fuller J.L., Sage N.E., Harris D.A., O'Connell T.C., Hedges R.E.M. Nitrogen balance and $\delta^{15}\text{N}$: why you're not what you eat during pregnancy // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2004. Vol. 18, iss. 23. P. 2889–2896. DOI: 10.1002/rcm.1708.
- Neuberger F.M., Jopp E., Graw M., Püschel K., Grupe G. Signs of malnutrition and starvation – reconstruction of nutritional life histories by serial isotopic analyses of hair // *Forensic Science International*. 2013. Vol. 226 (1–3). P. 22–32. DOI: 10.1016/j.forsciint.2012.10.037.
- Mekota A.M., Grupe G., Ufer S., Cuntz U. Serial analysis of stable nitrogen and carbon isotopes in hair: monitoring starvation and recovery phases of patients suffering from anorexia nervosa // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2006. Vol. 20, iss. 10. P. 1604–1610. DOI: 10.1002/rcm.2477.
- O'Leary M.H. Carbon Isotopes in Photosynthesis: Fractionation techniques may reveal new aspects of carbon dynamics in plants // *BioScience*. 1988. Vol. 38, iss. 5. P. 328–336. DOI: 10.2307/1310735.
- Schoeninger M.J., Moore K. Bone stable isotope studies in archaeology // *Journal of World Prehistory*. 1992. Vol. 6, iss. 2. P. 247–296. DOI: 10.1007/BF00975551.
- McCutchan J.H., Lewis W.M., Kendall C., McGrath C.C. Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur // *Oikos*. 2003. Vol. 102, iss. 2. P. 378–390. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2003.12098.x.
- Drucker D., Bocherens H. Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers of change in diet breadth during middle and upper palaeolithic in Europe // *International Journal of Osteoarchaeology*. 2004. Vol. 14, iss. 3–4. P. 162–177. DOI: 10.1002/oa.753.
- Ammer S., Bartelink E., Vollner J., Anderson B., Cunha E. Socioeconomic and geographic implications from carbon, nitrogen, and sulfur isotope ratios in human hair from Mexico // *Forensic Science International*. 2020. Vol. 316 (3–4). DOI: 10.1016/j.forsciint.2020.110455.
- Bowen G.J., Ehleringer J.R., Chesson L.A., Stange E., Cerling T.E. Stable isotope ratios of tap water in the contiguous United States // *Water Resources Research*. 2007. Vol. 43, iss. 3. DOI: 10.1029/2006WR005186.
- Hülsemann F., Lehn C., Schneiders S., Jackson G., Hill S., Rossmann A., Scheid N., Dunn P.J.H., Flenker U., Schänzer W. Global spatial distributions of nitrogen and carbon stable isotope ratios of modern human hair // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2015. Vol. 29, iss. 22. P. 2111–2121. DOI: 10.1002/rcm.7370.
- Valenzuela L.O., Chesson L.A., O'Grady S.P., Cerling T.E., Ehleringer J.R. Spatial distributions of carbon, nitrogen and sulfur isotope ratios in human hair across the Central United States // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2011. Vol. 25, iss. 7. P. 861–868. DOI: 10.1002/rcm.4934.
- Lehn C., Rossmann A., Graw M. Provenancing of unidentified corpses by stable isotope techniques – presentation of case studies // *Science & Justice*. 2015. Vol. 55, iss. 1. P. 72–88. DOI: 10.1016/j.scijus.2014.10.006.
- Williams J.R. *Medical ethics manual*. Ferney-Voltaire: World Medical Association, 2015. 134 p.

17. O'Connell T.C., Hedges R.E.M., Healey M.A., Simpson A.H.R.W. Isotopic comparison of hair, nail and bone: modern analyses // *Journal of Archaeological Science*. 2001. Vol. 28, iss. 11. P. 1247–1255. DOI: 10.1006/jasc.2001.0698.

18. Thompson A.H., Chesson L.A., Podlesak D.W., Bowen G.J., Cerling T.E., Ehleringer J.R. Stable isotope analysis of modern human hair collected from Asia (China, India, Mongolia, and Pakistan) // *American Journal of Biolog-*

ical Anthropology. 2010. Vol. 141, iss. 3. P. 440–451. DOI: 10.1002/ajpa.21162.

19. Bender R.L., Dufour D.L., Valenzuela L.O., Cerling T.E., Sponheimer M., Reina J.C., Ehleringer J.R. Stable isotopes (carbon, nitrogen, sulfur), diet, and anthropometry in urban Colombian women: investigating socioeconomic differences // *American Journal of Human Biology*. 2015. Vol. 27, iss. 2. P. 207–218 DOI: 10.1002/ajhb.22640.

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<p>Иванова Елена Сергеевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель эколого-аналитической лаборатории кафедры биологии; Череповецкий государственный университет (г. Череповец, Вологодская область, Российская Федерация). E-mail: stepinaelena@yandex.ru.</p> <p>Румянцева Ольга Юрьевна, аспирант, научный сотрудник кафедры биологии; Череповецкий государственный университет (г. Череповец, Вологодская область, Российская Федерация). E-mail: olgamaks1995@gmail.com.</p> <p>Заверткина Анастасия Сергеевна, студент факультета биологии и здоровья человека; Череповецкий государственный университет (г. Череповец, Вологодская область, Российская Федерация). E-mail: zavertkina02@inbox.ru.</p> <p>Буева Анастасия Евгеньевна, студент факультета биологии и здоровья человека; Череповецкий государственный университет (г. Череповец, Вологодская область, Российская Федерация). E-mail: aebueva@chsu.ru.</p> <p>Елизарова Анна Сергеевна, ведущий лаборант центра исследования воды; Муниципальное унитарное предприятие города Череповца «Водоканал» (г. Череповец, Вологодская область, Российская Федерация). E-mail: anya.elizarova.98@mail.ru.</p>	<p>Ivanova Elena Sergeevna, candidate of biological sciences, leading researcher, head of Ecological and Analytical Laboratory of Biology Department; Cherepovets State University (Cherepovets, Vologda Region, Russian Federation). E-mail: stepinaelena@yandex.ru.</p> <p>Rumiantseva Olga Yurievna, postgraduate student, researcher of Biology Department; Cherepovets State University (Cherepovets, Vologda Region, Russian Federation). E-mail: olgamaks1995@gmail.com.</p> <p>Zavertkina Anastasia Sergeevna, student of Biology and Human Health Faculty; Cherepovets State University (Cherepovets, Vologda Region, Russian Federation). E-mail: zavertkina02@inbox.ru.</p> <p>Bueva Anastasia Evgenievna, student of Biology and Human Health Faculty; Cherepovets State University (Cherepovets, Vologda Region, Russian Federation). E-mail: aebueva@chsu.ru.</p> <p>Elizarova Anna Sergeevna, leading laboratory assistant of Water Research Center; «Vodokanal» Municipal Unitary Enterprise of Cherepovets city (Cherepovets, Vologda Region, Russian Federation). E-mail: anya.elizarova.98@mail.ru.</p>

Для цитирования:

Иванова Е.С., Румянцева О.Ю., Заверткина А.С., Буева А.Е., Елизарова А.С. Изотопный состав волос населения Вологодской области в зависимости от условий проживания и питания // Самарский научный вестник. 2021. Т. 10, № 4. С. 46–50. DOI: 10.17816/snv2021104107.