

Журнал медико-биологических исследований. 2024. Т. 12, № 1. С. 70–79.
Journal of Medical and Biological Research, 2024, vol. 12, no. 1, pp. 70–79.

Научная статья
УДК 611.018.5+612.12(985)(479)(045)
DOI: 10.37482/2687-1491-Z178

Сравнительный анализ мононенасыщенных жирных кислот в периферической крови жителей различных климатогеографических территорий

Борис Александрович Шенгоф* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3776-1474>
Фатима Артемовна Бичкаева* ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2970-4469>
Екатерина Васильевна Нестерова* ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8467-2514>

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук
(Архангельск, Россия)

Аннотация. Нарушение эндогенного синтеза, изменение количества и качественного состава жирных кислот пищи могут стать патогенетическими факторами целого ряда метаболически обусловленных заболеваний. **Целью** работы стал сравнительный анализ содержания мононенасыщенных жирных кислот (МНЖК): пальмитолеиновой, элаидиновой, олеиновой, гондоиновой, эруковой, нервоновой – в периферической крови жителей различных климатогеографических территорий. **Материалы и методы.** В исследовании, проводившемся с 2008 по 2018 год, приняли участие 697 чел. в возрасте от 22 до 60 лет. В зависимости от постоянного проживания все участники были разделены на группы: 1) жители арктического региона (АР) России; 2) лица, проживающие в приполярном регионе (ПР) России; 3) жители Южного Кавказа (ЮК). Содержание МНЖК в сыворотке крови оценивалось с помощью метода газожидкостной хроматографии. **Результаты.** Анализ полученных данных показал, что у жителей АР и ПР суммарная концентрация МНЖК в периферической крови статистически значимо ниже, чем у представителей ЮК. В частности, у жителей северных регионов зарегистрированы более низкие концентрации пальмитолеиновой, олеиновой и гондоиновой кислот. Кроме того, у представителей АР уровень элаидиновой кислоты был выше относительно данных жителей ЮК, а концентрация эруковой кислоты – ниже, чем у лиц из ПР и ЮК. При этом статистически значимо меньшая концентрация нервоновой кислоты была выявлена у представителей ЮК по сравнению с данными лиц, проживающих в ПР, а вероятность различий со значениями этого показателя у жителей АР находилась на уровне статистической тенденции. Таким образом, воздействие экстремальных факторов Севера вызывает адаптационные перестройки жирового обмена на уровне основных и минорных компонентов жирных кислот. При этом комплекс изменений тесно связан со структурой питания и может рассматриваться как результат несбалансированного рациона.

Ключевые слова: мононенасыщенные жирные кислоты, пальмитолеиновая кислота, элаидиновая кислота, олеиновая кислота, арктический регион, приполярный регион, Южный Кавказ.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы ФНИР ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № 122011800399-2 (руководитель – доктор биологических наук Ф.А. Бичкаева).

Ответственный за переписку: Борис Александрович Шенгоф, адрес: 163001, г. Архангельск, просп. Ломоносова, д. 249; e-mail: b-shengof@yandex.ru

Для цитирования: Шенгоф, Б. А. Сравнительный анализ мононенасыщенных жирных кислот в периферической крови жителей различных климатогеографических территорий / Б. А. Шенгоф, Ф. А. Бичкаева, Е. В. Нестерова // Журнал медико-биологических исследований. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 70-79. – DOI: 10.37482/2687-1491-Z178.

Original article

Comparative Analysis of Monounsaturated Fatty Acids in the Peripheral Blood of Residents of Different Climatic Regions

Boris A. Shengof* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3776-1474>

Fatima A. Bichkaeva* ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2970-4469>

Ekaterina V. Nesterova* ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8467-2514>

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russian Federation)

Abstract. Disordered endogenous synthesis as well as changes in the quantity and qualitative composition of fatty acids in the diet can become pathogenetic factors in a number of metabolic diseases. The **purpose** of this article was a comparative analysis of the content of monounsaturated fatty acids (palmitoleic, elaidic, oleic, gondoic, erucic and nervonic) in the peripheral blood of residents of different climatic regions. **Materials and methods.** The research was conducted between 2008 and 2018 and involved 697 subjects aged 22 to 60 years. Depending on the region of permanent residence, all the participants were divided into three groups: 1) residents of the Arctic region (AR); 2) people living in the circumpolar region (CR); 3) residents of the South Caucasus (SC). The level of monounsaturated fatty acids (MUFAs) in the blood serum was evaluated using gas-liquid chromatography. **Results.** The analysis of the data obtained demonstrates that the total concentration of MUFAs in the peripheral blood of AR and CR residents is statistically significantly lower compared to the people of SC. In particular, northerners showed lower concentrations of palmitoleic, oleic and gondoic acids. Moreover, in the AR group, the level of elaidic acid was higher than in the SC group, while the concentration of erucic acid was lower than in the CR and SC groups. In terms of nervonic acid, a statistically significantly lower content was detected in SC residents compared to the CR group, while the probability of differences between SC and AR residents was at the trend level. Thus, extreme factors of the North cause adaptive rearrangements in fat metabolism at the level of major and minor fatty acid components. At the same time, the changes are closely linked with the structure of nutrition and can be attributed to an unbalanced diet.

Keywords: monounsaturated fatty acids, palmitoleic acid, elaidic acid, oleic acid, Arctic region, subpolar region, South Caucasus.

Funding. The work was carried out within the Fundamental Research of FECIAR UrB RAS, topic no. 122011800399-2 (leader – Dr. Sci. (Biol.) F.A. Bichkaeva).

For citation: Shengof B.A., Bichkaeva F.A., Nesterova E.V. Comparative Analysis of Monounsaturated Fatty Acids in the Peripheral Blood of Residents of Different Climatic Regions. *Journal of Medical and Biological Research*, 2024, vol. 12, no. 1, pp. 70–79. DOI: 10.37482/2687-1491-Z178

Corresponding author: Boris Shengof, *address:* prosp. Lomonosova 249, Arkhangelsk, 163001, Russian Federation; *e-mail:* b-shengof@yandex.ru

Физиологически комфортными районами проживания человека традиционно считаются умеренные широты с относительно стабильными климатогеографическими изменениями. Какое-либо отклонение от такого типа условий проживания в разной степени оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека [1]. К настоящему времени уже накоплено достаточно фактов, указывающих на негативное влияние экологических условий высоких широт [2–4]. Комплекс абиотических раздражителей в сочетании с особенностями питания формирует у человека на Севере особый «полярный» метаболический тип [5]. Организм переходит на новый уровень гомеостаза, для которого характерны иные экологически обусловленные нормы метаболических показателей, что, в свою очередь, выражается в формировании региональных особенностей биохимического профиля.

Важнейший вклад в понимание процессов адаптации метаболической системы человека к условиям Севера внесли научные труды Л.Е. Панина, В.П. Казначеева, Е.Р. Бойко [6–8]. Полученные ими результаты показали, что ряд ключевых параметров метаболизма у жителей циркумполярных территорий отличается от среднеширотных показателей. При этом их различия у представителей разных групп населения были взаимосвязаны с длительностью проживания на Севере. В целом анализ рассматриваемого материала позволяет прийти к выводу, что процесс адаптации человека к комплексу внешнесредовых факторов, прежде всего, характеризуется повышением энергетических трат, что связано с увеличением интенсивности обменных процессов. При этом основным энергетическим субстратом для синтеза макроэргических молекул служат насыщенные и мононенасыщенные жирные кислоты.

Экзогенные и эндогенные жирные кислоты в организме человека влияют на различные фундаментальные процессы жизнедеятельности. Они являются важнейшим компонентом клеточной мембраны, играют решающую

роль в энергетическом гомеостазе, участвуют в процессах синтеза различных биологически важных соединений, обеспечивают нормальную функциональную активность многих ферментов. Нарушение эндогенного синтеза, изменение количества и качественного состава жирных кислот пищи могут стать патогенетическими факторами целого ряда метаболически обусловленных заболеваний [9, 10]. В этом контексте исследование жирнокислотных компонентов периферической крови представляется актуальным не только для понимания закономерностей процессов жирового обмена, но и для разработки проблемы сбалансированного питания у человека в различных экологических условиях жизнедеятельности.

Проведенные в последнее время исследования показали наличие определенных особенностей метаболизма жирных кислот в периферической крови жителей различных климатогеографических территорий [11, 12]. Однако в представленных работах метаболические параметры жителей Арктики рассматриваются в отрыве от показателей уроженцев южных регионов, что, по нашему мнению, может не в полной мере отражать адаптационные перестройки метаболизма жирных кислот у первых. В связи с этим целью данного исследования было установление особенностей содержания мононенасыщенных жирных кислот (МНЖК) в периферической крови жителей северных и южных регионов.

Материалы и методы. За период с 2008 по 2018 год обследованы 697 чел. (мужчины и женщины) в возрасте от 22 до 60 лет. По месту своего рождения и постоянного проживания все участники исследования были разделены на три группы: в первую вошли 265 жителей арктического региона России (АР; 71–65° с. ш.: с. Гыда, с. Сёяха, с. Антипаюта, с. Ныда, г. Надым Ямало-Ненецкого автономного округа; пос. Нельмин-Нос, с. Несь Ненецкого автономного округа); во вторую – 246 чел., проживающих в приполярном регионе России (ПР; 64° с. ш.: пос. Пинега Архангельской области, г. Архангельск); в третью – 186 жителей Юж-

ного Кавказа (ЮК; 42° с. ш.: г. Цхинвал, Республика Южная Осетия).

Арктика характеризуется экстремальными для постоянного проживания человека природно-климатическими условиями. К специфическим экологическим факторам высоких широт можно отнести продолжительную зиму с частыми бурями, метелями и морозами, резкие перепады атмосферного давления, контрастную динамику светового дня и факторы электромагнитной природы. Климат исследованных арктических территорий преимущественно формируется под влиянием арктических и атлантических воздушных масс, которые обуславливают отрицательную среднегодовую температуру воздуха – около -10°C [3, 13]. Условия для проживания в приполярных областях не столь экстремальны, как на Крайнем Севере, но все же являются дискомфортными для местного населения. Выбранные для изучения приполярные территории находятся в зоне умеренного климатического пояса, с умеренно-континентальным климатом, который формируется под влиянием северных морей в условиях малого количества солнечной радиации зимой. Частая смена воздушных масс, усиленная циклоническая деятельность обуславливают неустойчивую погоду. Средняя годовая температура воздуха здесь положительная – от $0,1$ до $2,0^{\circ}\text{C}$ [14]. Климатогеографические условия Южной Осетии неоднородны, но в целом соответствуют климату умеренных широт, поскольку основная часть ее территории расположена в горной местности. Исследование проводилось в г. Цхинвале, где эколого-климатические условия для проживания человека считаются физиологически комфортными. Территория города расположена в предгорьях Большого Кавказа на высоте $500\text{--}600$ м над уровнем моря в зоне субтропического климата, со среднегодовой температурой воздуха $11,2^{\circ}\text{C}$ [15].

Средний возраст обследованного населения составил ($M\pm SD$): в АР – $42,41\pm 11,06$ года; в ПР – $42,56\pm 10,85$ года; в ЮК – $39,40\pm 11,09$ года. Все участники относились к I и II группам здоровья, находились вне периода обострения своих

хронических заболеваний. Исследование проводилось на добровольной основе с соблюдением всех норм и принципов биомедицинской этики согласно требованиям Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения медицинских исследований с участием человека в качестве субъекта» (версия 2013 года).

Забор крови из локтевой вены выполнялся в утренние часы строго натощак, спустя $10\text{--}12$ ч после последнего приема пищи. Оценка содержания жирных кислот в сыворотке крови включала экстракцию липидов с последующим их метилированием. Анализ метиловых производных проводился на газовом хроматографе Agilent 7890A (США) с пламенно-ионизационным детектором. Для разделения полученных образцов применялась капиллярная колонка Agilent DB-23, $60\text{ м} \times 0,25\text{ мм} \times 0,15\text{ мкм}$ (США). Идентификация пиков осуществлялась с использованием стандарта GLS-569B (Nu-Chek-Prep., США). Количественный расчет МНЖК: пальмитолеиновой (*цис*-9-гексадеценовой, C16:1n-7c), элаидиновой (*транс*-9-октадеценовой, C18:1n-9t), олеиновой (*цис*-9-октадеценовой, C18:1n-9c), гондоиновой (*цис*-11-эйкозеновой, C20:1n-9c), эруковой (*цис*-13-докозеновой, C22:1n-9c), нервоновой (*цис*-15-тетракозеновой, C24:1n-9c) – проводился по методу внутреннего стандарта (нонадекановая кислота) в программе Agilent ChemStation B.03.01 (США) [16].

Статистический анализ собранных данных выполнялся в программе IBM SPSS Statistics 22.0 (США). Проверка гипотезы о нормальном распределении случайной величины в исследуемых выборках проводилась с помощью теста Шапиро–Уилка. По результатам проверки была выявлена асимметрия рядов распределения. В связи с этим в качестве меры центральной тенденции рассчитывались значения медианы (Me), а меры рассеяния включали значения 1-го и 3-го квартилей (Q_1 ; Q_3). Предварительная оценка статистической значимости различий между тремя независимыми группами осуществлялась с использованием не-

параметрического анализа Крускала–Уоллиса (H -тест). Апостериорные сравнения были выполнены с применением критерия Манна–Уитни (U -тест). Для снижения вероятности ложноположительного заключения использовалась поправка Бонферрони. Найденные различия считались статистически достоверными при уровне статистической значимости $p < 0,05$.

Результаты. Математический анализ полученных данных позволил выявить статистически значимые региональные различия в показателях МНЖК (см. *таблицу*).

В целом, ориентируясь на суммарное содержание МНЖК в периферической крови, можно сделать вывод о меньшем содержании данного типа кислот у жителей АР и ПР по сравнению с представителями ЮК. В частности, у них отмечены более низкие концентрации пальмитолеиновой, олеиновой и гондоиновой кислот. Кроме того, в группе АР уровень элаидиновой кислоты был статистически значимо выше относительно данных жителей ЮК, а концентрация эруковой кислоты – статистически значимо ниже показателей в группах ПР и ЮК. При этом статисти-

Сравнение содержания МНЖК в периферической крови жителей арктического (АР; $n = 265$), приполярного (ПР; $n = 246$) регионов России и представителей Южного Кавказа (ЮК; $n = 186$)
Comparison of MUFA content in the peripheral blood of residents of the Arctic ($n = 265$) and circumpolar ($n = 246$) regions of Russia and representatives of the South Caucasus ($n = 186$)

Кислота	Группа	Концентрация, Me (Q_1 ; Q_3), мкг/мл	H -тест	U -тест
МНЖК	1 (АР)	420,93 (324,12; 537,31)	$\chi^2 = 30,66$ $p = 2,19 \cdot 10^{-7}$	$p_{1,2} = 0,21 \cdot 10^1$ $p_{1,3} = 1,78 \cdot 10^{-6}$ $p_{2,3} = 5,52 \cdot 10^{-7}$
	2 (ПР)	412,96 (311,58; 545,99)		
	3 (ЮК)	508,49 (385,80; 654,89)		
C16:1n-7c	1 (АР)	39,36 (25,50; 58,51)	$\chi^2 = 84,15$ $p = 5,35 \cdot 10^{-19}$	$p_{1,2} = 1,55 \cdot 10^{-7}$ $p_{1,3} = 1,82 \cdot 10^{-5}$ $p_{2,3} = 1,39 \cdot 10^{-17}$
	2 (ПР)	29,91 (20,65; 45,41)		
	3 (ЮК)	49,67 (33,09; 77,05)		
C18:1n-9t	1 (АР)	5,90 (3,69; 8,99)	$\chi^2 = 6,72$ $p = 3,48 \cdot 10^{-2}$	$p_{1,2} = 4,22 \cdot 10^{-1}$ $p_{1,3} = 2,45 \cdot 10^{-2}$ $p_{2,3} = 4,66 \cdot 10^{-1}$
	2 (ПР)	5,42 (3,56; 8,34)		
	3 (ЮК)	5,09 (3,55; 6,91)		
C18:1n-9c	1 (АР)	365,87 (277,33; 461,23)	$\chi^2 = 29,11$ $p = 4,77 \cdot 10^{-7}$	$p_{1,2} = 0,18 \cdot 10^1$ $p_{1,3} = 4,96 \cdot 10^{-7}$ $p_{2,3} = 5,68 \cdot 10^{-6}$
	2 (ПР)	362,59 (275,30; 494,52)		
	3 (ЮК)	443,88 (340,55; 563,42)		
C20:1n-9c	1 (АР)	2,83 (2,05; 3,78)	$\chi^2 = 61,72$ $p = 3,97 \cdot 10^{-14}$	$p_{1,2} = 3,49 \cdot 10^{-3}$ $p_{1,3} = 7,59 \cdot 10^{-15}$ $p_{2,3} = 5,22 \cdot 10^{-8}$
	2 (ПР)	3,09 (2,20; 4,43)		
	3 (ЮК)	3,90 (2,96; 4,99)		
C22:1n-9c	1 (АР)	0,42 (0,29; 0,71)	$\chi^2 = 26,99$ $p = 1,38 \cdot 10^{-6}$	$p_{1,2} = 4,80 \cdot 10^{-4}$ $p_{1,3} = 3,42 \cdot 10^{-6}$ $p_{2,3} = 1,03 \cdot 10^{-1}$
	2 (ПР)	0,57 (0,29; 0,86)		
	3 (ЮК)	0,57 (0,39; 0,87)		
C24:1n-9c	1 (АР)	1,12 (0,71; 1,98)	$\chi^2 = 11,68$ $p = 2,90 \cdot 10^{-3}$	$p_{1,2} = 7,10 \cdot 10^{-1}$ $p_{1,3} = 8,19 \cdot 10^{-2}$ $p_{2,3} = 1,35 \cdot 10^{-3}$
	2 (ПР)	1,17 (0,81; 1,88)		
	3 (ЮК)	1,05 (0,73; 1,38)		

чески значимо меньшая концентрация нервной кислоты была выявлена в группе ЮК по сравнению с данными лиц, проживающих в ПР, а вероятность различий со значениями данного показателя у жителей АР находилась на уровне статистической тенденции.

Обсуждение. Согласно результатам исследования, в группе жителей ЮК наблюдается более высокая концентрация пальмитолеиновой кислоты по сравнению с лицами из АР и ПР. При этом у 75 % обследованных из ПР концентрация данной кислоты не превышала 45,41 мкг/мл, что значительно ниже, чем у жителей АР и ЮК. Пальмитолеиновая кислота является одной из наиболее распространенных экзогенных кислот, поступающих с пищей. При этом в литературе отмечено, что около 10 % синтезированной клетками пальмитиновой кислоты (С16:0) в ходе реакции десатурации превращается в пальмитолеиновую кислоту [17]. С учетом этих фактов можно предположить, что высокий уровень пальмитолеиновой кислоты у жителей ЮК – результат соотношения субстрата и продукта реакции, тесно связанного с экзогенным их поступлением и активностью бактерий кишечника, т. к. пальмитолеиновая кислота является метаболитом микробиоты человека [18].

Анализируя содержание элаидиновой кислоты, следует отметить, что наиболее высокий уровень этого трансизомера был выявлен у жителей АР, наименьший – у лиц, проживающих на ЮК. Причем диапазон концентраций данной кислоты у 50 % обследованных лиц Арктики составил от 3,69 до 8,99 мкг/мл. Исходя из этого можно заключить, что у жителей Арктики встречаемость элаидиновой кислоты в привычных источниках пищи выше, чем у жителей ЮК. Согласно данным литературы, в пищевой промышленности при производстве жиров посредством каталитического гидрирования доминирующими трансжирами являются изомеры октадеценовой кислоты с преобладанием элаидиновой кислоты, а в рубце жвачных животных под действием ферментов в основном образуются октадекадиеновые кислоты преи-

мущественно с конъюгированными двойными связями [19]. Таким образом, можно сделать вывод, что у населения Арктики в современных условиях жизни происходит переход от традиционных источников пищи в пользу привозных продуктов с высокой долей гидрогенизированных жиров в составе, что является алиментарно-зависимым фактором риска не только сердечно-сосудистых заболеваний, но и нейродегенеративных нарушений [20].

При сравнении уровней олеиновой кислоты в периферической крови было установлено, что у лиц с ЮК он выше, чем у жителей АР и ПР. При этом в 50 % случаев концентрация данной кислоты у обследованных лиц в зоне субтропического климата составляла от 340,55 до 563,42 мкг/мл. Наличие одной двойной связи в структуре олеиновой кислоты дает ей достаточно высокую константу скорости реакции. Благодаря этому она более активно поглощается митохондриями клеток, чем пальмитиновая, линолевая и арахидоновая кислоты [21]. При этом нарабатывается максимальное количество энергии по сравнению с углеводным субстратом окисления [18]. В то же время олеиновая кислота является основной МНЖК, которую клетки синтезируют путем последовательных реакций элонгации и десатурации эндогенно синтезированной из ацетил-КоА пальмитиновой кислоты [22]. В связи с этим можно предположить, что низкие концентрации олеиновой кислоты в периферической крови жителей Севера обусловлены высоким уровнем основного обмена, что, по-видимому, связано с процессом адаптационных реакций к «северному стрессу».

Одновременно с этими изменениями обращает на себя внимание более высокий уровень гондоиновой кислоты у жителей ЮК по сравнению с обследованными из АР и ПР. При этом у представителей АР концентрация этой кислоты в 75 % случаев не превышает 3,78 мкг/мл, что статистически значимо ниже, чем у уроженцев ПР и ЮК. Основным источником гондоиновой кислоты для человека служат пищевые продукты, изготовленные на основе масел, полу-

чаемых из масленичных культур семейства крестоцветных [23]. Исходя из этого можно предположить дефицит таких продуктов в рационе питания жителей Арктики.

Не вызывает сомнения, что потребление жиров, извлекаемых из семян семейства крестоцветных, может влиять на концентрацию эруковой кислоты в периферической крови [24]. По нашим данным, у 50 % обследованных жителей Арктики уровень данной кислоты в сыворотке крови находится в пределах от 0,29 до 0,71 мкг/мл. Этот результат статистически значимо ниже, чем у представителей ПР и ЮК. Количественный сдвиг в сторону низких значений у жителей Заполярья носит, скорее, положительный характер, потому как избыточное потребление жиров с высоким содержанием эруковой кислоты может вызвать нарушение метаболизма триацилглицеролов с последующим их накоплением не только в миокарде, но и в различных тканях организма, за исключением клеток печени. В первую очередь это связывают с низкой скоростью окисления ацил-КоА эруковой кислоты митохондриальной ацил-КоА-дегидрогеназой с последующим ингибированием данного фермента, что в конечном итоге может стать причиной внутриклеточного липидоза [25].

Последней отличительной особенностью представленных данных является то, что статистически значимо более низкие концентрации нервоновой кислоты были выявлены в группе обследованных с Кавказа относительно лиц, проживающих в зоне Субарктики. В то же время вероятность различий у обследованного населения ЮК с данными жителей Арктики находилась на уровне статистической тенденции. Нервоновую кислоту в основном рассматривают как компонент сфинголипидов мембраны глиальных клеток. Показано, что сфингомиелин миелиновой оболочки аксона преимущественно синтезирован из сфингозина, имеюще-

го амидную связь с нервоновой кислотой [26]. Причем дефицит последней может стать одной из причин повышенной демиелинизации и снижения эффективности процесса ремиелинизации миелиновой оболочки нейронов как в периферической, так и в центральной нервной системе [27].

Таким образом, статистически значимые различия суммарного содержания МНЖК в периферической крови жителей АР и ПР относительно обследованных лиц ЮК в основном вызваны более низкими концентрациями пальмитолеиновой, олеиновой и гондоиновой кислот у первых. Кроме того, в группе АР уровень элаидиновой кислоты был смещен в сторону более высоких значений относительно представителей ЮК, а концентрация эруковой кислоты была ниже, чем у жителей ПР и ЮК. Вместе с тем у обследованных в ПР на фоне меньшей концентрации пальмитолеиновой кислоты выявлен статистически значимо более высокий уровень гондоиновой кислоты по сравнению с жителями АР. В свою очередь, статистически значимо более низкие концентрации нервоновой кислоты были установлены в группе ЮК относительно лиц, проживающих в ПР, а вероятность различий со значениями жителей АР находилась на уровне статистической тенденции.

В целом, результаты нашего исследования показали, что воздействие экстремальных факторов Севера на организм человека вызывает адаптационные перестройки жирового обмена на уровне основных и минорных компонентов жирных кислот в периферической крови. При этом комплекс установленных изменений тесно связан со структурой питания и может рассматриваться как результат несбалансированного рациона. Недостаток растительной пищи и избыток искусственных продуктов могут стать пусковыми факторами нарушения метаболических реакций, стимулирующих алиментарно-зависимые заболевания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список литературы

1. Новиков В.С., Сороко С.И. Физиологические основы жизнедеятельности человека в экстремальных условиях. СПб.: Политехника-принт, 2017. 476 с.
2. Петрова П.Г. Эколого-физиологические аспекты адаптации человека к условиям Севера // Вестн. Сев.-Вост. федер. ун-та им. М.К. Аммосова. Сер.: Мед. науки. 2019. № 2(15). С. 29–38.
3. Корчин В.И., Корчина Т.Я., Терникова Е.М., Бикбулатова Л.Н., Лапенко В.В. Влияние климатогеографических факторов Ямало-Ненецкого автономного округа на здоровье населения (обзор) // Журн. мед.-биол. исследований. 2021. Т. 9, № 1. С. 77–88. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z046>
4. Щетинина С.Ю., Юдичева Н.В. Влияние геомагнитной активности на состояние здоровья человека // Междунар. журн. гум. и естеств. наук. 2021. № 5-1(56). С. 167–169. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-5-1-167-169>
5. Панин Л.Е. Гомеостаз и проблемы приполярной медицины (методологические аспекты адаптации) // Бюл. Сиб. отд-ния РАМН. 2010. Т. 30, № 3. С. 6–11.
6. Панин Л.Е. Энергетические аспекты адаптации. Л.: Медицина. Ленингр. отд-ние, 1978. 192 с.
7. Казначеев В.П. Современные аспекты адаптации. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 192 с.
8. Бойко Е.Р. Физиолого-биохимические основы жизнедеятельности человека на Севере. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 190 с.
9. Schwingshackl L., Strasser B., Hoffmann G. Effects of Monounsaturated Fatty Acids on Cardiovascular Risk Factors: A Systematic Review and Meta-Analysis // Ann. Nutr. Metab. 2011. Vol. 59, № 2-4. P. 176–186. <https://doi.org/10.1159/000334071>
10. Hulbert A.J., Turner N., Storlien L.H., Else P.L. Dietary Fats and Membrane Function: Implications for Metabolism and Disease // Biol. Rev. 2005. Vol. 80, № 1. P. 155–169. <https://doi.org/10.1017/S1464793104006578>
11. Бичкаев А.А., Бичкаева Ф.А., Волкова Н.И., Шенгоф Б.А. Возрастные особенности мононенасыщенных жирных кислот у жителей Севера // Вестн. Урал. мед. акад. науки. 2014. № 3(49). С. 157–159.
12. Бичкаева Ф.А., Волкова Н.И., Лобанов А.А., Кочкин Р.А. Адаптивные возрастные изменения Омега-7 мононенасыщенных жирных кислот и параметров углеводного обмена в крови у жителей севера России // Вестн. Урал. мед. акад. науки. 2018. Т. 15, № 2. С. 151–161. <https://doi.org/10.22138/2500-0918-2018-15-2-151-161>
13. Доклад «О состоянии и охране окружающей среды Ненецкого автономного округа в 2016 году» / Департамент природ. ресурсов, экологии и агропром. комплекса Ненец. авт. округа, Центр природопользования и охраны окружающей среды. Нарьян-Мар, 2017. URL: http://cpoos-nao.ru/docs/doklad_o_sostojanii_okruzhajushhej_sredey_v_2016_g.docx (дата обращения: 10.05.2023).
14. Общая характеристика климата Архангельской области и Ненецкого автономного округа // Сев. управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: [сайт]. URL: <http://www.sevmeteo.ru/files/arh-nao.pdf> (дата обращения: 10.05.2023).
15. Бадов А.Д., Джисоева В.Д. Природные условия и ресурсы как важнейший фактор устойчивого социально-экономического развития Южной Осетии // Вестн. Адыг. гос. ун-та. Сер. 4: Естеств.-мат. и техн. науки. 2017. № 1(196). С. 91–94.
16. Патент № 2758932 С1 Рос. Федерация, МПК G01N 33/487, G01N 33/483, G01N 33/12, G01N 33/49, G01N 30/02. Способ измерения массовой концентрации метиловых эфиров жирных кислот в биологических средах методом газожидкостной хроматографии: № 2020124879; заявл. 17.07.2020; опубл. 03.11.2021 / Бичкаева Ф.А., Баранова Н.Ф., Власова О.С., Нестерова Е.В., Бичкаев А.А., Шенгоф Б.А., Третьякова Т.В. 31 с.
17. Рожкова Т.А., Ариповский А.В., Яровая Е.Б., Каминная В.И., Кухарчук В.В., Титов В.Н. Индивидуальные жирные кислоты плазмы крови: биологическая роль субстратов, параметры количества и качества, диагностика атеросклероза и атероматоза // Клини. лаб. диагностика. 2017. Т. 62, № 11. С. 655–665.
18. Каминная В.И., Рожкова Т.А., Соловьева Е.Ю., Коновалова Г.Г., Титов В.Н., Яровая Е.Б., Чирковская М.В. Вклад индивидуальных жирных кислот плазмы крови в формирование гиперлипидемий атерогенного генеза у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями // World Science: Problems and Innovations: сб. ст. XXIX Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 28 февр. 2019 г. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. С. 234–238.
19. Медведев О.С., Медведева З.О. Трансизомеры жирных кислот как опасный компонент нездорового питания // Вопр. диетологии. 2015. Т. 5, № 2. С. 54–63.

20. Hirata Y, Nada Y, Yamada Y, Toyama T, Fukunaga K, Hwang G.W, Noguchi T, Matsuzawa A. Elaidic Acid Potentiates Extracellular ATP-Induced Apoptosis via the P2X₇-ROS-ASK1-p38 Axis in Microglial Cell Lines // *Biol. Pharm. Bull.* 2020. Vol. 43, № 10. P. 1562–1569. <https://doi.org/10.1248/bpb.b20-00409>
21. Тумов В.Н., Дыгай А.М., Котловский М.Ю., Курдюк Е.В., Якименко А.В., Якимович И.Ю., Аксютина Н.В., Котловский Ю.В. Пальмитиновая, олеиновая кислоты и их роль в патогенезе атеросклероза // *Бюл. сиб. медицины.* 2014. Т. 13, № 5. С. 149–159. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2014-5-149-159>
22. Тумов В.Н. Синтез насыщенных, моноеновых, ненасыщенных и полиеновых жирных кислот в филогенезе. Эволюционные аспекты атеросклероза // *Успехи соврем. биологии.* 2012. Т. 132, № 2. С. 181–199.
23. Прахова Т.Я., Зеленина О.Н. Качественная характеристика маслосемян озимого рыжика // *Нива Поволжья.* 2009. № 3(12). С. 84–87.
24. Vetter W., Darwisch V., Lehnert K. Erucic Acid in *Brassicaceae* and Salmon – an Evaluation of the New Proposed Limits of Erucic Acid in Food // *NFS J.* 2020. Vol. 19. P. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2020.03.002>
25. Bremer J., Norum K.R. Metabolism of Very Long-Chain Monounsaturated Fatty Acids (22:1) and the Adaptation to Their Presence in the Diet // *J. Lipid Res.* 1982. Vol. 23, № 2. P. 243–256. [https://doi.org/10.1016/S0022-2275\(20\)38153-0](https://doi.org/10.1016/S0022-2275(20)38153-0)
26. Sassa T., Kihara A. Metabolism of Very Long-Chain Fatty Acids: Genes and Pathophysiology // *Biomol. Ther. (Seoul).* 2014. Vol. 22, № 2. P. 83–92. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2014.017>
27. Lewkowicz N., Piątek P., Namiecińska M., Domowicz M., Bonikowski R., Szemraj J., Przygodzka P., Stasiołek M., Lewkowicz P. Naturally Occurring Nervonic Acid Ester Improves Myelin Synthesis by Human Oligodendrocytes // *Cells.* 2019. Vol. 8, № 8. Art. № 786. <https://doi.org/10.3390/cells8080786>

References

- Novikov V.S., Soroko S.I. *Fiziologicheskie osnovy zhiznedeyatel'nosti cheloveka v ekstremal'nykh usloviyakh* [Physiological Bases of Human Life in Extreme Conditions]. St. Petersburg, 2017. 476 p.
- Petrova P.G. Ekologo-fiziologicheskie aspekty adaptatsii cheloveka k usloviyam Severa [Ecological and Physiological Aspects of Human Adaptation to the Conditions of the North]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Ser.: Meditsinskie nauki*, 2019, no. 2, pp. 29–38.
- Korchin V.I., Korchina T.Ya., Ternikova E.M., Bikbulatova L.N., Lapenko V.V. Influence of Climatic and Geographical Factors of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug on the Health of Its Population (Review). *J. Med. Biol. Res.*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 77–88. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z046>
- Shchetinina S.Yu., Yudicheva N.V. Vliyanie geomagnitnoy aktivnosti na sostoyanie zdorov'ya cheloveka [The Influence of Geomagnetic Activity on Human Health Condition]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2021, no. 5-1, pp. 167–169. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-5-1-167-169>
- Panin L.E. Gomeostaz i problemy pripolyarnoy meditsiny (metodologicheskie aspekty adaptatsii) [Homeostasis and Problems of Circumpolar Health (Methodological Aspects of Adaptation)]. *Byulleten' Sibirskogo otdeleniya RAMN*, 2010, vol. 30, no. 3, pp. 6–11.
- Panin L.E. *Energeticheskie aspekty adaptatsii* [Energy Aspects of Adaptation]. Leningrad, 1978. 192 p.
- Kaznacheev V.P. *Sovremennye aspekty adaptatsii* [Modern Aspects of Adaptation]. Novosibirsk, 1980. 192 p.
- Boyko E.R. *Fiziologo-biokhimicheskie osnovy zhiznedeyatel'nosti cheloveka na Severe* [Physiological and Biochemical Bases of Human Life in the North]. Yekaterinburg, 2005. 190 p.
- Schwingshackl L., Strasser B., Hoffmann G. Effects of Monounsaturated Fatty Acids on Cardiovascular Risk Factors: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Ann. Nutr. Metab.*, 2011, vol. 59, no. 2-4, pp. 176–186. <https://doi.org/10.1159/000334071>
- Hulbert A.J., Turner N., Storlien L.H., Else P.L. Dietary Fats and Membrane Function: Implications for Metabolism and Disease. *Biol. Rev.*, 2005, vol. 80, no. 1, pp. 155–169. <https://doi.org/10.1017/S1464793104006578>
- Bichkaev A.A., Bichkaeva F.A., Volkova N.I., Shengof B.A. Vozrastnye osobennosti mononenasyshchennykh zhirnykh kislot u zhiteley Severa [Age-Related Peculiarities of Monounsaturated Fatty Acids in Residents of the North]. *Vestnik Ural'skoy meditsinskoy akademicheskoy nauki*, 2014, no. 3, pp. 157–159.
- Bichkaeva F.A., Volkova N.I., Lobanov A.A., Kochkin R.A. Adaptive Aging Changes of Omega-7 Monounsaturated Fatty Acid and Parameters of Carbohydrate Metabolism in Blood of Inhabitants of the North of

Russia. *Vestnik Ural'skoy meditsinskoy akademicheskoy nauki*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 151–161 (in Russ.). <https://doi.org/10.22138/2500-0918-2018-15-2-151-161>

13. Report “On the State and Protection of the Environment of the Nenets Autonomous Area in 2016”. Naryan-Mar, 2017. Available at: http://cpoos-nao.ru/docs/doklad_o_sostojanii_okrzhajushhej_sredy_v_2016_g..docx (accessed: 10 May 2023) (in Russ.).

14. General Characteristics of the Climate of the Arkhangelsk Region and Nenets Autonomous Area. *Northern Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring*. Available at: <http://www.sevmeteo.ru/files/arh-nao.pdf> (accessed: 10 May 2023) (in Russ.).

15. Badov A.D., Dzhioeva V.D. Prirodnye usloviya i resursy kak vazhneyshiy faktor ustoychivogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Yuzhnoy Osetii [Natural Conditions and Resources as an Important Factor of Sustainable Socio-Economic Development of South Ossetia]. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskije nauki*, 2017, no. 1, pp. 91–94.

16. Bichkaeva F.A., Baranova N.F., Vlasova O.S., Nesterova E.V., Bichkaev A.A., Shengof B.A., Tretyakova T.V. *Method for Measuring Mass Concentration of Methyl Esters of Fatty Acids in Biological Media by Gas-Liquid Chromatography Method*. Patent RU2758932C1, 2021. 31 p. (in Russ.).

17. Rozhkova T.A., Aripovsky A.V., Yarovaya E.B., Kaminnaya V.I., Kukharchuk V.V., Titov V.N. The Individual Fatty Acids of Blood Plasma: Biological Role of Substrates, Parameters of Quantity and Quality, Diagnostic of Atherosclerosis and Atheromotosis. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika*, 2017, vol. 62, no. 11, pp. 655–665 (in Russ.).

18. Kaminnaya V.I., Rozhkova T.A., Solov'eva E.Yu., Konovalova G.G., Titov V.N., Yarovaya E.B., Chirkovskaya M.V. Vklad individual'nykh zhirnykh kislot plazmy krovi v formirovanie giperlipidemiy aterogennogo geneza u patientsov s serdechno-sosudistymi zabolevaniyami [Contribution of Individual Fatty Acids of Blood Plasma to the Formation of Atherogenic Hyperlipidemia in Patients with Cardiovascular Diseases]. *World Science: Problems and Innovations*. Penza, 2019, pp. 234–238.

19. Medvedev O.S., Medvedeva Z.O. Transizomery zhirnykh kislot kak opasnyy komponent nezdorovogo pitaniya [Trans-Isomer Fatty Acids as a Dangerous Component of Unhealthy Foods]. *Voprosy dietologii*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 54–63.

20. Hirata Y., Nada Y., Yamada Y., Toyama T., Fukunaga K., Hwang G.W., Noguchi T., Matsuzawa A. Elaidic Acid Potentiates Extracellular ATP-Induced Apoptosis via the P2X₇-ROS-ASK1-p38 Axis in Microglial Cell Lines. *Biol. Pharm. Bull.*, 2020, vol. 43, no. 10, pp. 1562–1569. <https://doi.org/10.1248/bpb.b20-00409>

21. Titov V.N., Dygai A.M., Kotlovskiy M.Yu., Kurdoyak Ye.V., Yakimenko A.V., Yakimovich I.Yu., Aksyutina N.V., Kotlovskiy Yu.V. Palmitic and Oleic Acids and Their Role in Pathogenesis of Atherosclerosis. *Bull. Sib. Med.*, 2014, vol. 13, no. 5, pp. 149–159 (in Russ.). <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2014-5-149-159>

22. Titov V.N. Sintez nasyschennykh, monoenovykh, nenasyschennykh i polienovykh zhirnykh kislot v filogeneze. Evolyutsionnye aspekty ateroskleroza [Synthesis of Saturated, Monoenic, Unsaturated and Polyenic Fatty Acids. Evolutionary Aspects of Atherosclerosis]. *Uspekhi sovremennoy biologii*, 2012, vol. 132, no. 2, pp. 181–199.

23. Prakhova T.Ya., Zelenina O.N. Kachestvennaya kharakteristika maslosemyan ozimogo ryzhika [Qualitative Characteristics of Winter Camelina Oilseeds]. *Niva Povolzh'ya*, 2009, no. 3, pp. 84–87.

24. Vetter W., Darwisch V., Lehnert K. Erucic Acid in *Brassicaceae* and Salmon – an Evaluation of the New Proposed Limits of Erucic Acid in Food. *NFS J.*, 2020, vol. 19, pp. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2020.03.002>

25. Bremer J., Norum K.R. Metabolism of Very Long-Chain Monounsaturated Fatty Acids (22:1) and the Adaptation to Their Presence in the Diet. *J. Lipid Res.*, 1982, vol. 23, no. 2, pp. 243–256. [https://doi.org/10.1016/S0022-2275\(20\)38153-0](https://doi.org/10.1016/S0022-2275(20)38153-0)

26. Sassa T., Kihara A. Metabolism of Very Long-Chain Fatty Acids: Genes and Pathophysiology. *Biomol. Ther. (Seoul)*, 2014, vol. 22, no. 2, pp. 83–92. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2014.017>

27. Lewkowicz N., Piątek P., Namiecińska M., Domowicz M., Bonikowski R., Szemraj J., Przygodzka P., Stasiólek M., Lewkowicz P. Naturally Occurring Nervonic Acid Ester Improves Myelin Synthesis by Human Oligodendrocytes. *Cells*, 2019, vol. 8, no. 8. Art. no. 786. <https://doi.org/10.3390/cells8080786>

Поступила в редакцию 27.06.2023 / Одобрена после рецензирования 06.12.2023 / Принята к публикации 08.12.2023.
Submitted 27 June 2023 / Approved after reviewing 6 December 2023 / Accepted for publication 8 December 2023.