

УДК 612.397.23:591.826:613.25:796.015.574]-092.9:599.323.4
DOI 10.34014/2227-1848-2019-3-106-113

СОДЕРЖАНИЕ ЖИРНЫХ КИСЛОТ В ЖИРОВОЙ ТКАНИ КРЫС ПРИ АНАЭРОБНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ НА ФОНЕ ПИТАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ КАЛОРИЙНОСТИ

И.Ю. Якимович¹, М.Ю. Котловский², С.В. Гусакова¹, В.В. Иванов¹,
В.Н. Васильев¹, А.М. Дыгай², И.В. Долгалев¹, А.В. Панимаскина¹,
Л.Ю. Котловская², Ю.О. Самойлова¹

¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Томск, Россия;

²НИИ фармакологии и регенеративной медицины им. Е.Д. Гольдберга
ФГБНУ «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук»,
г. Томск, Россия

e-mail: iness2501@yandex.ru

Цель – исследовать воздействие анаэробной физической нагрузки на процентное содержание жирных кислот в жировой ткани разной локализации на фоне питания повышенной калорийности у крыс.

Материалы и методы. В исследовании использовали крыс линии Wistar, находящиеся на питании повышенной калорийности (с долей жира 32 %). В первой группе животных физическая нагрузка отсутствовала, крысы второй группы получали физическую нагрузку преимущественно анаэробного характера в виде плавания. Процентное содержание 24 жирных кислот (ЖК) и значение 14 интегративных показателей (комплексов) в депо висцеральной и подкожной жировой ткани определяли на хромато-масс-спектрометре (Agilent Technologies, США).

Результаты. Анаэробная физическая нагрузка привела к увеличению содержания в мезентеральной жировой ткани насыщенных ЖК (НасЖК) и снижению ненасыщенных ЖК (НЖК), а также снижению индекса ненасыщенности; увеличению в брюшинной жировой ткани ЖК-субстратов сфингофосфолипидов, ЖК-субстратов мембран, снижению субстратов энергии, увеличению содержания ЖК-субстратов витамина F за счет $\omega 6$ НЖК. При этом в подкожном депо наблюдалось снижение суммы полиненасыщенных ЖК, а баланс $\omega 3/\omega 6$ сместился в сторону $\omega 6$ НЖК. В мезентеральной и брюшинной жировой ткани отмечалось снижение содержания мононенасыщенных ЖК (МНЖК) за счет $\omega 9$ НЖК, а соотношение НасЖК/МНЖК сместилось в сторону НасЖК. Только в брюшинной жировой ткани было установлено снижение содержания $\omega 7$ НЖК за счет С16:1 $\omega 7$.

Выводы. Регулярная анаэробная физическая нагрузка на фоне питания повышенной калорийности продемонстрировала наиболее выраженное влияние в отношении ЖК в висцеральной жировой ткани, а именно в мезентеральной и брюшинной.

Ключевые слова: жирные кислоты, комплексы жирных кислот, жировая ткань, анаэробная физическая нагрузка, диета повышенной калорийности.

Введение. Входящие в состав липидов жирные кислоты (ЖК) являются основным субстратом, благодаря которому происходит реализация функции трофологии [1]. Отдельные жирные кислоты играют определенную роль во многих биологических функциях, включая поддержание гомеостаза, экспрессию генов, трансдукцию сигналов, обеспечение энергетическими ресурсами [2].

Жировая ткань (ЖТ) в организме обеспечивает функцию локомоции в период отсутствия поступления питательных веществ извне [1]. При этом ЖТ разной локализации (висцеральное и подкожное жировые депо) имеет свои метаболические и функциональные особенности [3].

Физическая нагрузка является ключевым фактором расходования энергии [4]. Физиче-

ские упражнения влияют на липидный обмен и оказывают моделирующее воздействие на ЖК-состав липидов тканей. При кратковременных интервальных интенсивных физических нагрузках в наибольшей степени активируются анаэробные пути энергообеспечения клеток. Данный вид нагрузки повышает мобилизацию ЖК в восстановительный период после тренировки [5, 6]. Физическая нагрузка является одним из важных факторов профилактики дисфункции ЖТ [7].

Цель исследования. Оценить воздействие анаэробной физической нагрузки на процентное содержание жирных кислот в жировой ткани разной локализации на фоне питания повышенной калорийности у крыс.

Материалы и методы. Исследование проведено на белых крысах линии Wistar (10 шт.). Крысы в течение эксперимента содержались в стандартных условиях на естественном световом режиме со свободным доступом к пище и воде. Проводимые над животными манипуляции соответствовали правилам лабораторной практики.

Животные были разделены на две группы и находились на питании повышенной калорийности (суточное содержание жира в пище составляло 32 % общей калорийности). После адаптационного периода (15 дней) крысы второй группы получали физическую нагрузку преимущественно анаэробного характера в виде плавания (6 нед.) в заданном режиме: через 1 день в течение 80 с в три подхода с периодами отдыха 5 мин и отягощением 8 % от массы тела. Вид нагрузки определялся методом максимального стабильного содержания лактата в сыворотке крови крыс [8]. Вывод животных из эксперимента проводился при помощи CO₂-асфиксии.

Липиды экстрагировались методом J. Folch [9] из навесок жировой ткани (250 мг) разной локализации: мезентериальной (МЖТ), подкожно-паховой (ПЖТ), забрюшинной (ЗЖТ). Исследование метиловых эфиров ЖК производилось на хромато-масс-спектрометре (Agilent Technologies, США). При этом использовалась хроматографическая колонка HP-5MS (Agilent Technologies, США) длиной 30 м, внешним диаметром 0,25 мм и толщиной пленки 0,25 мкм.

Идентификация эфиров ЖК проводилась при помощи сравнения экспериментальных масс-спектров со спектрами баз данных программ NIST MS Search 2.0 и AMDIS Analysis, а также путем сопоставления времени выхода анализируемого образца со временем выхода известных, предварительно метилированных стандартов ЖК.

Содержание ЖК: 14 ненасыщенных ЖК (НЖК) и 10 насыщенных (НасЖК) – отображалось в процентах от общей суммы площадей пиков.

Анализировались значения 14 интегральных показателей (комплексов) ЖК. В их состав вошли: $\Sigma \omega 3$, $\omega 6$, $\omega 7$, $\omega 9$, НЖК, НасЖК, полиненасыщенные ЖК (ПНЖК) (C18:3+C20:3+C20:4+C20:5+C22:6), мононенасыщенные ЖК (МНЖК), НасЖК с четным числом атомов углерода (НасЖК четных), НасЖК с нечетным числом атомов углерода (НасЖК нечетных), ЖК-субстраты витамина F (C18:2+C18:3+C20:4+C20:5+C22:6), сфингофосфолипидов (СФЛ) (C24:1 $\omega 9$ +C24:0), глицерофосфолипидов (ГФЛ) (C16:0+C18:1 $\omega 9$ +C18:2+C18:3), энергии (МНЖК+НасЖК), мембран (C18:3+C18:2+C20:2+C20:3+C20:4+C20:5+C22:6), а также индекс ненасыщенности (ИН=(НЖК/НасЖК)×100). Анализировалось изменение соотношений отдельных ЖК между собой и с их комплексами с целью оценки изменения активности отдельных ферментов, отвечающих за метаболизм ЖК и функционирование систем транспорта, антиоксидантной защиты, депонирования, окисления и эндогенного образования данных ЖК.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программы SPSS 22.0 методами непараметрической статистики. Результаты представлены в виде медианы (Me), верхнего и нижнего квартилей (Q1, Q3). Различия считались достоверными при $p < 0,05$.

Результаты. У крыс с регулярной анаэробной физической нагрузкой на фоне питания повышенной калорийности в ЗЖТ и ПЖТ отмечено более низкое ($p < 0,05$) процентное содержание C18:3 $\omega 3$ (табл. 1). Помимо этого, в ПЖТ более низким ($p < 0,05$) оказался уровень C20:5 и $\Sigma \omega 3$ НЖК (табл. 2). В то же время в ЗЖТ при физической нагрузке более вы-

соким ($p < 0,05$) было содержание C18:2 и $\Sigma \omega 6$ НЖК. В свою очередь в ПЖТ отмечено пониженное ($p < 0,05$) содержание C20:3 и повышение ($p < 0,05$) значения $\omega 3/\omega 6$, что указывало на сдвиг баланса в направлении $\omega 3$ НЖК. В группе крыс с физической нагрузкой в ЗЖТ зафиксировано пониженное ($p < 0,05$) содержание C16:1 $\omega 7$ и значение $\Sigma \omega 7$ НЖК. В МЖТ и

ЗЖТ установлен сниженный ($p < 0,05$) уровень C18:1 $\omega 9$ и $\Sigma \omega 9$ НЖК. При этом в МЖТ более высоким ($p < 0,05$) было содержание C22:1, а в ЗЖТ – C24:1. При анаэробной физической нагрузке в МЖТ зафиксировано более высокое содержание C18:0 ($p < 0,05$). Кроме того, в МЖТ отмечено увеличенное ($p < 0,05$) содержание C16:0 и Σ НасЖК четных.

Таблица 1

**Содержание основных жирных кислот
в жировой ткани разной локализации у крыс, Ме [Q1; Q3]**

Шифр жирных кислот	Подкожная жировая ткань		Забрюшинная жировая ткань		Мезентериальная жировая ткань	
	контроль	нагрузка	контроль	нагрузка	контроль	нагрузка
C18:3 $\omega 3$	0,046 [0,043; 0,054]	0,024 [0,023; 0,032]*	0,06 [0,05; 0,064]	0,042 [0,036; 0,049]*	0,04 [0,03; 0,05]	0,03 [0,02; 0,09]
C20:5 $\omega 3$	0,013 [0,01; 0,016]	0,0086 [0,0076; 0,01]*	0,009 [0,007; 0,013]	0,009 [0,008; 0,011]	0,01 [0,007; 0,012]	0,009 [0,007; 0,051]
C18:2 $\omega 6$	38,25 [36,33; 38,88]	38,11 [36,8; 39,37]	37,02 [35,99; 37,86]	39,86 [38,66; 41,01]*	37,62 [36,58; 38,49]	37,01 [34,84; 38,46]
C20:3 $\omega 6$	0,089 [0,087; 0,96]	0,066 [0,06; 0,068]*	0,063 [0,061; 0,072]	0,072 [0,07; 0,08]	0,063 [0,062; 0,065]	0,06 [0,05; 0,1]
C16:1 $\omega 7$	1,21 [1,17; 1,37]	0,71 [0,63; 1,32]	1,31 [1,28; 1,7]	0,94 [0,88; 1,17]*	1,14 [0,95; 1,2]	1,2 [0,79; 3,53]
C18:1 $\omega 9$	34,17 [32,7; 36,11]	34,63 [33,45; 35,87]	35,30 [34,28; 36,4]	32,35 [31,60; 34,1]*	36,27 [35,31; 37,02]	33,74 [30,79; 34,39]*
C22:1 $\omega 9$	0,012 [0,01; 0,02]	0,016 [0,014; 0,024]	0,012 [0,01; 0,03]	0,011 [0,008; 0,017]	0,009 [0,008; 0,01]	0,02 [0,016; 0,022]*
C24:1 $\omega 9$	0,005 [0,003; 0,051]	0,009 [0,005; 0,01]	0,004 [0,003; 0,01]	0,0079 [0,0072; 0,0084]*	0,0055 [0,0032; 0,0064]	0,008 [0,003; 0,013]
C14:0	0,74 [0,71; 0,86]	0,62 [0,54; 0,79]	0,8 [0,77; 0,89]	0,675 [0,657; 0,749]*	0,65 [0,6; 0,67]	0,68 [0,57; 1,45]
C16:0	12,2 [11,9; 12,98]	11,06 [10,56; 12,97]	12,23 [12,1; 12,38]	12,06 [11,76; 12,39]	10,79 [10,59; 11,02]	13,29 [11,57; 17,95]*
C18:0	2,93 [2,65; 3,23]	3,26 [3,06; 3,52]	2,8 [2,43; 2,94]	3,13 [2,81; 3,31]	2,65 [2,37; 2,84]	3,21 [2,79; 3,64]*
C17:0	0,142 [0,138; 0,17]	0,16 [0,15; 0,17]	0,132 [0,13; 0,15]	0,17 [0,15; 0,19]*	0,12 [0,11; 0,13]	0,15 [0,12; 0,21]
C14:0/ C16:0	6,1 [5,9; 6,6]	5,6 [5,2; 6,1]	7 [6,3; 7,2]	6 [5,6; 6,1]*	6 [5,5; 6,4]	5,1 [4,9; 7,9]
C16:0/ C18:0	409 [401; 461]	325 [320; 417]	433 [419; 512]	376 [369; 437]	400 [385; 459]	457 [348; 535]
C16:0/ C16:1 $\omega 7$	1022 [907; 1058]	1566 [1048; 1667]	929 [737; 952]	1279 [1064; 1337]*	929 [906; 1157]	1156 [582; 1475]
C18:0/ C18:1 $\omega 9$	8,2 [7,8; 9,7]	9,2 [8,8; 10,5]	7,7 [7; 8,3]	9,3 [8,7; 10,3]*	7 [6; 8]	9 [8; 12]*
C16:0/ C18:1 $\omega 9$	35 [33; 40]	33 [29; 38]	35 [33; 36]	37 [35; 39]	30 [29; 31]	39 [34; 59]*

Таблица 2

**Содержание комплексов основных жирных кислот
в жировой ткани разной локализации у крыс, Ме [Q1; Q3]**

Комплексы жирных кислот	Подкожная жировая ткань		Забрюшинная жировая ткань		Мезентериальная жировая ткань	
	контроль	нагрузка	контроль	нагрузка	контроль	нагрузка
Σ ω3	0,08 [0,07; 0,11]	0,051 [0,046; 0,058]*	0,082 [0,08; 0,1]	0,07 [0,06; 0,09]	0,07 [0,06; 0,08]	0,053 [0,046; 0,258]
Σ ω6	38,84 [36,9; 39,47]	38,6 [37,33; 39,95]	37,46 [36,38; 38,28]	40,36 [39,08; 41,44]*	38,08 [36,97; 38,88]	37,45 [35,69; 38,81]
ω3/ω6	0,2 [0,19; 0,27]	0,14 [0,12; 0,15]*	0,23 [0,21; 0,27]	0,17 [0,15; 0,22]	0,17 [0,16; 0,2]	0,14 [0,12; 0,73]
Σ ω7	10,19 [9,91; 10,45]	10,19 [9,96; 10,57]	10,57 [10,32; 10,79]	10,12 [9,86; 10,25]*	10,92 [10,56; 11,13]	10,5 [9,32; 10,83]
Σ ω9	34,56 [33,14; 36,57]	35,07 [33,87; 36,28]	35,68 [34,65; 36,78]	32,82 [32,02; 34,5]*	36,62 [35,68; 37,4]	34,1 [31,27; 34,88]*
Σ НасЖК четных	15,83 [15,58; 17,13]	15,31 [14,54; 17,03]	15,83 [15,72; 16,13]	15,88 [15,69; 16,43]	14,08 [13,98; 14,52]	17,25 [15,38; 22,95]*
Σ НасЖК нечетных	0,38 [0,36; 0,44]	0,38 [0,37; 0,39]	0,37 [0,36; 0,42]	0,45 [0,4; 0,46]*	0,32 [0,31; 0,34]	0,37 [0,33; 0,53]
Σ СФЛ	0,018 [0,014; 0,021]	0,03 [0,017; 0,032]	0,017 [0,014; 0,019]	0,03 [0,021; 0,029]*	0,021 [0,015; 0,023]	0,026 [0,013; 0,032]
Σ Суб. мембран	38,94 [36,97; 39,56]	38,65 [37,39; 40,01]	37,55 [36,47; 38,37]	40,44 [39,14; 41,52]*	38,14 [37,04; 38,96]	37,5 [35,94; 38,86]
Σ Суб. энергии	61,06 [60,44; 63,03]	61,35 [59,99; 62,61]	62,45 [61,63; 63,53]	59,56 [58,48; 60,86]*	61,86 [61,04; 62,96]	62,5 [61,14; 64,06]
Σ ПНЖК	0,54 [0,53; 0,59]	0,43 [0,39; 0,49]*	0,4 [0,37; 0,47]	0,37 [0,35; 0,46]	0,4 [0,36; 0,45]	0,4 [0,31; 0,88]
ПНЖК/ С18:1 ω9	1,2 [1,13; 1,37]	1 [0,8; 1,1]*	0,87 [0,8; 1]	0,9 [0,8; 1,1]	0,83 [0,75; 0,97]	0,9 [0,7; 2,2]
Σ Вит. F	38,73 [36,77; 39,35]	38,44 [37,22; 39,75]	37,37 [36,33; 38,21]	40,2 [38,94; 41,35]*	38 [36,9; 38,8]	37,35 [35,62; 38,72]
Вит. F/ С18:1 ω9	114 [102; 120]	110 [105; 119]	106 [100; 111]	124 [114; 131]*	105 [100; 110]	112 [110; 117]
Σ МНЖК	44,83 [43,16; 46,83]	45,17 [43,92; 46,86]	46,06 [45,41; 47,32]	42,99 [41,94; 44,65]*	47,56 [46,24; 48,52]	44,72 [40,58; 45,58]*
ПНЖК/ МНЖК	1,2 [1,13; 1,37]	1 [0,8; 1,1]*	0,87 [0,78; 1,03]	0,87 [0,78; 1,08]	0,83 [0,75; 0,97]	0,9 [0,7; 2,2]
Вит. F/МНЖК	87 [79; 91]	85 [80; 90]	81 [77; 84]	94 [87; 99]*	80 [76; 84]	85 [83; 89]
Σ НЖК	83,79 [82,44; 84,06]	84,32 [82,6; 85,08]	83,81 [83,46; 83,9]	83,69 [83,15; 83,84]	85,6 [85,14; 85,71]	82,41 [76,53; 84,25]*
Σ НасЖК	16,21 [15,94; 17,56]	15,68 [14,92; 17,4]	16,19 [16,1; 16,54]	16,31 [16,16; 16,85]	14,4 [14,29; 14,86]	17,59 [15,75; 23,47]*
НасЖК/ МНЖК	36 [35; 41]	35 [32; 39]	35 [34; 36]	38 [36; 40]*	30,1 [29,7; 32]	39 [35; 58]*
ИН	517 [470; 527]	538 [475; 570]	518 [505; 521]	513 [494; 519]	594 [573; 600]	472 [332; 535]*

В ЗЖТ наблюдалось сниженное значение уровня С14:0 ($p < 0,05$), более низкое ($p < 0,05$) значение С14:0/С16:0, следовательно, повышенное эндогенное образование С16:0. Отмечено увеличенное ($p < 0,05$) значение соотношения С18:0/С18:1 ω 9 в МЖТ и ЗЖТ, что свидетельствовало о пониженной активности десатуразы при синтезе ω 9 НЖК. Только в МЖТ было повышенным ($p < 0,05$) значение С16:0/С18:1 ω 9, что говорило о непропорциональности образования и расходования С18:1 ω 9. На фоне анаэробной физической нагрузки в ЗЖТ более высоким ($p < 0,05$) было содержание С17:0 и Σ НасЖК нечетных, а также ЖК-субстратов СФЛ. Там же оказался повышенным ($p < 0,05$) уровень ЖК-субстратов мембран и сниженным уровень ЖК-субстратов энергии. В ПЖТ при физической нагрузке более низкими ($p < 0,05$) были Σ ПНЖК и значение их соотношения с С18:1 ω 9. Только в ЗЖТ было увеличено ($p < 0,05$) содержание ЖК-субстратов витамина F и соотношение витамина F/С18:1 ω 9. В МЖТ и ЗЖТ отмечалось пониженное ($p < 0,05$) значение Σ МНЖК. В то же время значение соотношения МНЖК и ПНЖК было сниженным ($p < 0,05$) в ПЖТ, а МНЖК и ЖК-субстратов витамина F – увеличенным ($p < 0,05$) в ЗЖТ. В МЖТ было отмечено более низкое ($p < 0,05$) значение суммы НЖК и более высокое ($p < 0,05$) – суммы НасЖК. Повышенным оказалось ($p < 0,05$) значение НасЖК/МНЖК. В то же время было отмечено более низкое ($p < 0,05$) значение ИН.

Обсуждение. Проведенное исследование показало, что регулярная анаэробная физическая нагрузка на фоне питания повышенной калорийности оказала наибольшее влияние на содержание ЖК и их комплексы в МЖТ. Было отмечено снижение НЖК и увеличение НасЖК, что приводило к снижению значения ИН. При этом известно, что увеличение уровня НасЖК в адипоцитах уменьшает скорость липолиза ЖК [10]. Уменьшилось содержание МНЖК преимущественно за счет ω 9 НЖК, а именно С18:1 ω 9. Снизилась активность десатуразы при ее образовании. Известно, что триглицериды, в составе которых преобладают МНЖК, более чувствительны к действию липаз [11]. Данное снижение может

быть вызвано усиленным потреблением МНЖК для обеспечения функции локомоции. Увеличилось процентное содержание НасЖК четных за счет С16:0 и С18:0. Соотношение НасЖК/МНЖК сместилось в сторону НасЖК. Данные ЖК необходимы в организме для энергетического обеспечения тканей [12], а также реализации структурной функции, поскольку входят в состав мембран клеток [13].

Менее выраженным, но также существенным было влияние регулярной анаэробной физической нагрузки на ЖК в ЗЖТ. Отмечено увеличение содержания ЖК-субстратов СФЛ. Повысилось содержание ЖК-субстратов мембран и снизилось содержание субстратов энергии. Это могло быть отражением повышенного β -окисления данных ЖК. При этом повышение жидкостности мембран клеток улучшает чувствительность тканей к действию инсулина [14]. Было отмечено увеличение содержания ЖК-субстратов витамина F за счет увеличения уровня ω 6 НЖК, а именно С18:2. Известно, что повышение содержания данной НЖК может стимулировать развитие воспаления [15]. Эти ЖК относятся к эссенциальным НЖК и не могут быть синтезированы в организме человека при поступлении извне с пищей [16]. Снизилось содержание МНЖК за счет ω 9 НЖК, в частности С18:1 ω 9. Уменьшилось содержание ω 7 НЖК за счет С16:1 ω 7. Было отмечено снижение активности работы десатураз при эндогенном образовании ω 7 и ω 9 НЖК. Известно, что при дефиците экзогенных ПНЖК эндогенно образованные ω 7 и ω 9 НЖК могут замещать их в аннулярных липидах мембран и являться субстратами синтеза эйкозаноидов с отличными, менее благоприятными биологическими свойствами [17]. Кроме того, МНЖК являются более эффективными антиоксидантами, чем α -токоферол, каротин и аскорбиновая кислота [18]. В данном случае мы отмечаем снижение антиоксидантной защиты ЖК-субстратов витамина F. Повысился уровень НасЖК нечетных за счет С17:0. Увеличилось образование С16:0 НасЖК. Известно, что С16:0 НасЖК является конечным продуктом биосинтеза ЖК в цитоплазме [19] с дальнейшей элонгацией в эндоплазматиче-

ском ретикулуме [20]. Баланс МНЖК и НасЖК сместился в сторону НасЖК. Как уже говорилось, МНЖК являются более предпочтительным субстратом для β -окисления, чем НасЖК.

В свою очередь в ПЖТ анаэробная физическая нагрузка на фоне питания повышенной калорийности понизила содержание ПНЖК. Уменьшилось их соотношение с МНЖК и С18:1 ω 9. Это могло свидетельствовать об увеличении антиоксидантной защиты ПНЖК. В то же время увеличение содержания ПНЖК из эндогенно образованных МНЖК повышает микровязкость клеточных мембран и снижает отрицательный заряд на их поверхности [21]. При этом нарушается функционирование трансмембранных белков [22]. Данное сниже-

ние произошло за счет ω 3 НЖК. При этом уменьшилось содержание С18:3 и С20:5 ω 3 НЖК. Несмотря на снижение С20:3 ω 6 НЖК, баланс ω 3/ ω 6 сместился в сторону ω 6 НЖК. Известно, что ω 3 и ω 6 ПНЖК конкурируют между собой, метаболизируясь одними и теми же ферментами [23]. Также известно, что С20:3 ω 6 НЖК являются биомаркером резистентности к инсулину [24].

Заключение. Таким образом, исследование показало, что регулярная анаэробная физическая нагрузка на фоне питания повышенной калорийности наиболее выраженное влияние продемонстрировала в отношении жирных кислот в висцеральной жировой ткани, а именно в мезентеральной и забрюшинной жировой ткани.

Литература

1. *Vegiopoulos A., Rohm M., Herzig S.* Adipose tissue: between the extremes. *EMBO J.* 2017; 36 (4): 1999–2017.
2. *Petridou A., Nikolaidis M.G., Matsakas A.* Effect of exercise training on the fatty acid composition of lipid classes in rat liver, skeletal muscle, and adipose tissue. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2005; 94 (1–2): 84–92.
3. *Tchkonina T., Thomou T., Zhu Y., Karagiannides I., Pothoulakis C., Jensen M.D., Kirkland J.L.* Mechanisms and metabolic implications of regional differences among fat depots. *Cell Metab.* 2013; 17 (5): 644–656.
4. *Thompson D., Karpe F., Lafontan M., Frayn Kh.* Physical Activity and Exercise in the Regulation of Human Adipose Tissue Physiology. *Physiological Reviews.* 2012; 92 (1): 157–191. DOI: 10.1152/physrev.00012.2011.
5. *Shen Y., Xu X., Yue K., Xu G.* Effect of different exercise protocols on metabolic profiles and fatty acid metabolism in skeletal muscle in high-fat diet-fed rats. *Obesity (Silver Spring).* 2015; 23 (5): 1000–1006.
6. *Costill D.L., Wilmore J.H., Kenney W.L.* Physiology of sport and Exercise. Champaign: Human Kinetics; 2012. 621.
7. *Gibala M.J., Little J.P., Macdonald M.J., Hawley J.A.* Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J. Physiol.* 2012; 590: 1077–1084.
8. *Kim Jong-Hee, Park Y.* Combined effects of phytochemicals and exercise on fatty acid oxidation. *J. Exerc. Nutrition Biochem.* 2016; 20 (4): 20–26. DOI: 10.20463/jenb.2016.0053.
9. *Folch J.* A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J. Biol. Chem.* 1957; 226 (1): 497–509.
10. *Watt M.J., Spriet L.L.* Triacylglycerol lipases and metabolic control: implications for health and disease. *Am. J. Physiol. Metab.* 2010; 299: 162–168.
11. *Gillingham L.G., Gustafson J.A., Han S.Y.* High-oleic rapeseed (canola) and flaxseed oils modulate serum lipids and inflammatory biomarkers in hyper cholesterolaemic subjects. *Br. J. Nutr.* 2011; 105 (3): 417–427.
12. *Тумов В.Н.* Транспорт липопротеидами насыщенных и полиеновых жирных кислот. *Успехи современной биологии.* 1997; 117 (2): 240–253.
13. *Болдырев А.А., Кяйвярайнен Е.И., Илюха В.А.* Биомембранология: учебное пособие. Петрозаводск: Изд-во Кар НЦ РАН; 2006. 226.
14. *Frayn K.N., Hodson L., Karpe F.* Dietary fat and insulin sensitivity. *Diabetologia.* 2010; 53 (5): 799–801.
15. *Aldámiz-Echevarría L., Prieto J., Andrade F., Elorz J., Sanjurjo P., Soriano J.R.* Arachidonic Acid Content in Adipose Tissue Is Associated With Insulin Resistance in Healthy Children. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition.* 2007; 44 (1): 77–83.

16. Северин Е.С., ред. Биохимия: учебник. 5-е изд., испр. и доп. Москва: ГЭОТАР-Медиа; 2016. 768.
17. Grosfeld A., Zilberfarb V., Turban S., Andre J., Guerre-Millo M., Issad T. Hypoxia increases leptin expression in human PAZ6 adipose cells. *Diabetologia*. 2002; 45: 527–530.
18. Тумов В.Н., Лисицын Д.М., Разумовский С.Д. Методические вопросы и диагностическое значение определения перекисного окисления липидов в липопротеинах низкой плотности. Олеиновая кислота как биологический антиоксидант (обзор литературы). *Клиническая лабораторная диагностика*. 2005; 4: 3–10.
19. Smidt K. Zinc-transporter genes in human visceral and subcutaneous adipocytes: lean versus obese. *Mol. Cell Endocrinol*. 2007; 264 (1/2): 68–73.
20. Peter A., Weigert C., Staiger H. Individual stearoyl-coadesaturase 1 expression modulates endoplasmic reticulum stress and inflammation in human myotubes and is associated with skeletal muscle lipid storage and insulin sensitivity in vivo. *Diabetes*. 2009; 58: 1757–1765.
21. Геннис Р. Биомембраны. Молекулярная структура и функция. Москва: Мир; 1997. 624.
22. Heitzer T., Schlinzig T., Krohn K. Endothelial dysfunction, oxidative stress, and risk of cardiovascular events in patients with coronary artery disease. *Circulation*. 2001; 104: 2673–2678.
23. Hwang D. Fatty acids and immune responses – a new perspective in searching for clues to mechanisms. *Annu. Rev. Nutr*. 2000; 20: 431–456.
24. Ni Y., Zhao L., Yu H., Ma X., Bao Y., Rajani C. Circulating unsaturated fatty acids delineate the metabolic status of obese individuals. *EBioMedicine*. 2015; 2 (10): 1513–1522.

FATTY ACID CONTENTS IN RAT ADIPOSE TISSUES UNDER ANAEROBIC EXERCISE AND HIGH-CALORIE DIETS

I.Yu. Yakimovich¹, M.Yu. Kotlovskiy², S.V. Gusakova¹, V.V. Ivanov¹, V.N. Vasil'ev¹,
A.M. Dygay², I.V. Dolgalev¹, A.V. Panimaskina¹, L.Yu. Kotlovskaya², Yu.O. Samoylova¹

¹Siberian State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Tomsk, Russia;

²Goldberg Research Institute of Pharmacology and Regenerative Medicine,

Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

e-mail: iness2501@yandex.ru

The objective of the paper is to study the effects of anaerobic exercise on fatty acids percentage in adipose tissues of different localization under high-calorie diets in rats.

Materials and Methods. The authors examined Wistar rats under high calorie diets (32 % fat content).

In the first group the animals were not exposed to any physical exercise. In the second group rats were exposed to anaerobic physical activity, namely swimming. The percentage of 24 fatty acids (FA) and the value of 14 integrative indicators (complexes) in the depot of visceral and subcutaneous adipose tissues were determined using chromatography-mass spectrometry (Agilent Technologies, USA).

Results. Anaerobic exercise led to an increase in saturated FAs in the mesenteric adipose tissues and to a decrease in unsaturated FAs, as well as to a decrease in the unsaturation index; an increase in the retroperitoneal adipose tissue of the FA sphingophospholipid substrates, FA membrane substrates, a decrease in the energy substrates, an increase of vitamin F FA substrates due to $\omega 6$ of unsaturated FAs. At the same time, a decrease in the amount of polyunsaturated FAs was observed in the subcutaneous depot, and the balance between $\omega 3/\omega 6$ shifted towards $\omega 6$ of unsaturated FAs. In the mesenteric and retroperitoneal adipose tissues, there was a decrease in monounsaturated FAs due to $\omega 9$ of unsaturated FAs, and the ratio of saturated FAs/monounsaturated FAs shifted towards saturated FAs. Only in retroperitoneal adipose tissues there was a decrease in $\omega 7$ of saturated FAs due to C16: 1 $\omega 7$.

Conclusion. Regular anaerobic exercise and a high-calorie diet showed the most pronounced effect on FAs in visceral adipose tissues, namely in mesenteric and retroperitoneal tissues.

Keywords: fatty acids, fatty acid complexes, adipose tissues, anaerobic exercise, high-calorie diet.

References

1. Vegiopoulos A., Rohm M., Herzig S. Adipose tissue: between the extremes. *EMBO J*. 2017; 36 (4): 1999–2017.

2. Petridou A., Nikolaidis M.G., Matsakas A. Effect of exercise training on the fatty acid composition of lipid classes in rat liver, skeletal muscle, and adipose tissue. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2005; 94 (1–2): 84–92.
3. Tchkonina T., Thomou T., Zhu Y., Karagiannides I., Pothoulakis C., Jensen M.D., Kirkland J.L. Mechanisms and metabolic implications of regional differences among fat depots. *Cell Metab.* 2013; 17 (5): 644–656.
4. Thompson D., Karpe F., Lafontan M., Frayn Kh. Physical Activity and Exercise in the Regulation of Human Adipose Tissue Physiology. *Physiological Reviews.* 2012; 92 (1): 157–191. DOI: 10.1152/physrev.00012.2011.
5. Shen Y., Xu X., Yue K., Xu G. Effect of different exercise protocols on metabolic profiles and fatty acid metabolism in skeletal muscle in high-fat diet-fed rats. *Obesity (Silver Spring).* 2015; 23 (5): 1000–1006.
6. Costill D.L., Wilmore J.H., Kenney W.L. *Physiology of sport and Exercise.* Champaign: Human Kinetics; 2012. 621.
7. Gibala M.J., Little J.P., Macdonald M.J., Hawley J.A. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J. Physiol.* 2012; 590: 1077–1084.
8. Kim Jong-Hee, Park Y. Combined effects of phytochemicals and exercise on fatty acid oxidation. *J. Exerc. Nutrition Biochem.* 2016; 20 (4): 20–26. DOI: 10.20463/jenb.2016.0053.
9. Folch J. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J. Biol. Chem.* 1957; 226 (1): 497–509.
10. Watt M.J., Spriet L.L. Triacylglycerol lipases and metabolic control: implications for health and disease. *Am. J. Physiol. Metab.* 2010; 299: 162–168.
11. Gillingham L.G., Gustafson J.A., Han S.Y. High-oleic rapeseed (canola) and flaxseed oils modulate serum lipids and inflammatory biomarkers in hyper cholesterolaemic subjects. *Br. J. Nutr.* 2011; 105 (3): 417–427.
12. Titov V.N. Transport lipoproteidami nasyshchennykh i polienovykh zhirnykh kislot [Lipoprotein transport of saturated and polyene fatty acids]. *Uspekhi sovremennoy biologii.* 1997; 117 (2): 240–253 (in Russian).
13. Boldyrev A.A., Kyavyaryaynen E.I., Ilyukha V.A. *Biomembranologiya: uchebnoe posobie* [Biomembranology: manual]. Petrozavodsk: Izd-vo Kar NTs RAN; 2006. 226 (in Russian).
14. Frayn K.N., Hodson L., Karpe F. Dietary fat and insulin sensitivity. *Diabetologia.* 2010; 53 (5): 799–801.
15. Aldámiz-Echevarría L., Prieto J., Andrade F., Elorz J., Sanjurjo P., Soriano J.R. Arachidonic Acid Content in Adipose Tissue Is Associated With Insulin Resistance in Healthy Children. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition.* 2007; 44 (1): 77–83.
16. Severin E.S., ed. *Biokhimiya: uchebnik* [Biochemistry: textbook]. 5-e izd., ispr. i dop. Moscow: GEOTAR-Media; 2016. 768 (in Russian).
17. Grosfeld A., Zilberfarb V., Turban S., Andre J., Guerre-Millo M., Issad T. Hypoxia increases leptin expression in human PAZ6 adipose cells. *Diabetologia.* 2002; 45: 527–530.
18. Titov V.N., Lisitsyn D.M., Razumovskiy S.D. Metodicheskie voprosy i diagnosticheskoe znachenie opredeleniya perekisnogo okisleniya lipidov v lipoproteinakh nizkoy plotnosti. Oleinovaya kislota kak biologicheskii antioksidant (obzor literatury) [Methodological issues and diagnostic value of lipid peroxidation detection in low density lipoproteins. Oleic acid as a biological antioxidant (review)]. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika.* 2005; 4: 3–10 (in Russian).
19. Smidt K. Zinc-transporter genes in human visceral and subcutaneous adipocytes: lean versus obese. *Mol. Cell Endocrinol.* 2007; 264 (1/2): 68–73.
20. Peter A., Weigert C., Staiger H. Individual stearyl-coadesaturase 1 expression modulates endoplasmic reticulum stress and inflammation in human myotubes and is associated with skeletal muscle lipid storage and insulin sensitivity in vivo. *Diabetes.* 2009; 58: 1757–1765.
21. Gennis R. Biomembrany. *Molekulyarnaya struktura i funktsiya* [Biomembranes. Molecular structure and function]. Moscow: Mir; 1997. 624 (in Russian).
22. Heitzer T., Schlinzig T., Krohn K. Endothelial dysfunction, oxidative stress, and risk of cardiovascular events in patients with coronary artery disease. *Circulation.* 2001; 104: 2673–2678.
23. Hwang D. Fatty acids and immune responses – a new perspective in searching for clues to mechanisms. *Ann. Rev. Nutr.* 2000; 20: 431–456.
24. Ni Y., Zhao L., Yu H., Ma X., Bao Y., Rajani C. Circulating unsaturated fatty acids delineate the metabolic status of obese individuals. *EBioMedicine.* 2015; 2 (10): 1513–1522.