

УДК 637.344.8

И.А. Барковская

ФГАНУ «ВНИМИ» - Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, г. Москва

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ К ИММОБИЛИЗАЦИИ ЭССЕНЦИАЛЬНЫХ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ¹¹

Неполноценное питание и потребление пищевых продуктов низкого качества способствуют усугублению йододефицита и распространению неинфекционных алиментарно-зависимых заболеваний. Существующие подходы к профилактике дефицита микроэлемента имеют ряд ограничений, в связи с чем сохраняется актуальность разработки новых йодированных ингредиентов. В работе проведена оценка потенциала различных видов молочной сыворотки к иммобилизации йода и цинка. Установлено, что наибольшей способностью к связыванию микроэлементов обладают подсырные сыворотки, полученные при сычужной и кислотно-сычужной коагуляции белков молока.

Ключевые слова: *молочная сыворотка, сывороточные белки, йододефицит, йод, цинк, иммобилизация*

Одной из актуальных проблем современного общества остается рацион питания низкого качества, провоцирующий дефицит жизненно важных эссенциальных микроэлементов, таких как йод [1, 2]. Дефициты различного рода вызывают неинфекционные алиментарно-зависимые заболевания, которые, согласно статистике сферы мирового здравоохранения, являются причиной 73 % всех случаев глобаль-

¹¹ Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 24-26-00220.

ной смертности [3]. При этом, йододефицитные заболевания занимают второе место в рейтинге заболеваний эндокринной системы организма (одна из причин возникновения – несбалансированное питание [4]), после сахарного диабета [5]. Кроме того, параллельно с широкой распространенностью дефицитов различного рода и ассоциируемых с ними патологий усугубляется проблема обеспечения населения достаточным количеством качественной пищевой продукции, обусловленная непрерывным ростом численности жителей планеты [6]. В связи с этим, актуальность приобретают исследования, направленные на создание подходов, которые, с одной стороны, будут обеспечивать общество полноценным питанием, а с другой – способствовать эффективной переработке сельскохозяйственного сырья.

Среди стратегий восполнения дефицита йода значительное внимание уделяется разработке алиментарных средств доставки микроэлементов [7]. Так, известны методы обогащения основных сельскохозяйственных культур эссенциальными нутриентами при выращивании (биофортификация), подходы к обеспечению разнообразия рациона питания (диверсификация) [8]. Кроме того, за последнее десятилетие создан широкий ассортимент йодированных пищевых компонентов и продуктов [2, 7, 9]. Однако, не взирая на вариативность способов обогащения продуктов массового спроса йодом и спектра специализированных добавок, можно выделить ряд недостатков, таких как неоднозначные результаты клинических исследований в сфере агротехнического подхода к обогащению сырья [8], сниженная стабильность неорганических соединений йода [10], пониженная растворимость йодосодержащих добавок, отсутствие в составе продовольственных товаров микроэлементов, сопутствующих более эффективному усвоению йода в организме (например, цинка) [11, 12, 13] и др. Учитывая перечисленные ограничения, актуальным направлением научных исследований становится разработка новых пищевых ингредиентов с высокой стабильностью и биодоступностью йода, обеспечивающих положительный результат в борьбе с дефицитом микроэлемента.

Молочная сыворотка, получаемая в промышленности от производства ряда продуктов – перспективное сырье для получения пищевого ингредиента, обогащенного йодом и цинком. Ее привлекательность обоснована содержанием сывороточных белков, способных связывать йод и хелатировать цинк благодаря специфике строения молекул и аминокислотного состава [2]. Помимо этого, разработка алиментарных средств для профилактики йододефицитных состояний с применением вторичного сырья является актуальным ввиду необходимости решения вопроса глубокой переработки молочного сырья и снижения негативного воздействия на экологию [14, 15]. Цель данной работы – оценка потенциала разных видов молочной сыворотки к иммобилизации йода и цинка.

Объектами исследования были состав молочных сывороток (от производства казеина, творога, копреципитата и сыра методами микрофльтрации; кислотной, сычужной, кислотно-сычужной, термокислотной и термокальциевой) и аминокислотный состав сывороточных белков. Оценку потенциала молочных сывороток производили расчетным путем с учетом концентрации α -лактальбумина (α -ЛА), β -лактоглобулина (β -ЛГ) и бычьего сывороточного альбумина (БСА), содержания

в них аминокислот [16] (исходя из установленной массовой доли белка в сыворотке, соответствующей 3 %).

Согласно литературным источникам такие кислоты, как аланин, метионин, аспарагиновая и глутаминовая кислоты, фенилаланин, тирозин и др. способны связывать йодид-ионы [17, 18]. Ионы цинка могут хелатировать цистеин, гистидин, пролин, глутаминовую и аспарагиновую кислоты [19, 20]. В этой связи представляет интерес оценка потенциала различных видов сыворотки как носителей йода и цинка. Для расчетов по связыванию ионов йода и цинка в работе использованы физико-химические данные (табл. 1), опубликованные коллективом авторов ранее в [21], дополненные классификацией молочных сывороток на основе интегративного подхода [22].

Согласно разработанной классификации молочной сыворотки [22], основанной на различных способах коагуляции белка, молочная промышленность получает вторичное сырье следующих видов: казеиновая сыворотка, полученная при микрофльтрации сырья (MF-CNW); подсырная и казеиновая сыворотки, полученные при сычужной коагуляции (RC-CHW и RC-CNW соответственно); творожная и подсырная сыворотки, полученные при кислотно-сычужной коагуляции (A/RC-CTW и A/RC-CHW соответственно); творожная и казеиновая сыворотки, полученные при кислотной коагуляции (AC-CTW и AC-CNW соответственно); подсырная сыворотка, полученная при термокислотной коагуляции (TAC-CHW) и копреципитатная сыворотка, полученная при термокальциевой коагуляции (TCC-CPW).

По результатам проведенных расчетов установлено, что наилучшими субстратами для иммобилизации йода и цинка являются сыворотки, полученные в результате сычужной и кислотно-сычужной коагуляции белков молока при производстве сыра: потенциальные концентрации связанных ионов йода и цинка составили 37,57 мг йода на 100 г сыворотки и 2,62 мг цинка на 100 г сыворотки – для RC-CHW и 38,52 мг йода на 100 г сыворотки и 2,69 мг цинка на 100 г сыворотки – для A/RC-CHW (табл. 2).

Поскольку известно, что наиболее прочную ковалентную связь с йодом образуют только ароматические аминокислоты (в первую очередь – тирозин) [17], дополнительно проведен расчет максимального количества связанного с аминокислотой йода для каждой сыворотки, в результате чего для RC-CHW и A/RC-CHW определено максимальное количество связанного с тирозинами α -ЛА, β -ЛГ и БСА йода – 1,646 и 1,699 мг соответственно. Полученные данные подтверждают перспективность использования молочной сыворотки для производства йодированных пищевых ингредиентов и обогащения продуктов питания различного происхождения.

Таблица 1

Физико-химический состав сывороток в соответствии с предложенной классификацией [21 22]

Наименование показателя	Вид сыворотки								
	MF-CNW	RC-CHW	RC-CNW	A/RC-CTW	A/RC-CHW	AC-CTW	AC-CNW	TAC-CHW	TCC-CPW
М.д. сухих веществ, %	6,51±0,20	7,04±0,15	6,91±0,18	6,19±0,21	6,69±0,19	6,13±0,16	6,61±0,15	7,04±0,22	6,65±0,21
Активная кислотность, рН	6,41±0,07	6,39±0,05	6,42±0,07	5,14±0,05	5,81±0,02	4,55±0,05	4,32±0,03	5,45±0,06	6,82±0,04
М.д. общего белка, %	0,62±0,06	0,92±0,07	0,87±0,07	0,47±0,05	0,83±0,09	0,55±0,05	0,67±0,06	0,30±0,06	0,24±0,02
М.д. β-лактоглобулина, %	0,29±0,02	0,36±0,04	0,33±0,02	0,24±0,05	0,36±0,03	0,30±0,02	0,32±0,02	0,05±0,03	0,05±0,02
М.д. α-лактальбумина, %	0,13±0,01	0,15±0,02	0,11±0,02	0,10±0,03	0,16±0,02	0,12±0,01	0,14±0,01	0,06±0,02	0,07±0,03
М.д. БСА, %	0,047±0,005	0,034±0,004	0,036±0,004	0,033±0,005	0,038±0,005	0,021±0,003	0,029±0,003	0,007±0,002	0,005±0,001
М.д. лактозы, %	4,52±0,13	5,03±0,17	5,05±0,12	4,04±0,18	4,46±0,15	3,71±0,19	4,74±0,11	5,21±0,18	5,28±0,12
М.д. минеральных веществ, %	0,56±0,03	0,51±0,02	0,49±0,03	0,61±0,02	0,53±0,04	0,67±0,04	0,72±0,03	0,64±0,04	0,57±0,05
Содержание Са, мг/100 г	50,12±2,30	54,32±3,44	51,39±2,21	78,15±2,92	66,31±2,36	90,98±2,72	108,48±3,63	85,36±3,31	63,05±2,91

MF – микрофилтрация; AC – кислотная коагуляция; RC – сычужная коагуляция; A/RC – кислотно-сычужная коагуляция; TAC – термोकислотная коагуляция; TCC – термокальциевая коагуляция
 CNW – казеиновая сыворотка; CHW – подсырная сыворотка; CTW – творожная сыворотка; CPW – копреципитатная сыворотка
 М.д. – массовая доля

Таблица 2

Теоретическая концентрация максимально возможного связывания ионов цинка и йода с основными белками молочных сывороток (α-ЛА, β-ЛГ, БСА)

Наименование показателя	Вид сыворотки								
	MF-CNW	RC-CHW	RC-CNW	A/RC-CTW	A/RC-CHW	AC-CTW	AC-CNW	TAC-CHW	TCC-CPW
Цинк, мг/100 г сыворотки	2,25	2,62	2,30	1,80	2,69	2,12	2,36	0,56	0,60
в т.ч. α-ЛА	0,61	0,71	0,52	0,47	0,75	0,56	0,66	0,28	0,33
β-ЛГ	1,41	1,75	1,60	1,17	1,75	1,46	1,55	0,24	0,24
БСА	0,23	0,17	0,18	0,16	0,19	0,10	0,14	0,03	0,02
Йод, мг/100 г сыворотки	32,27	37,57	32,98	25,79	38,52	30,46	33,75	7,95	8,47
в т.ч. α-ЛА	8,53	9,85	7,22	6,56	10,50	7,88	9,19	3,94	4,60
β-ЛГ	20,37	25,29	23,18	16,86	25,29	21,07	22,48	3,51	3,51
БСА	3,37	2,44	2,58	2,37	2,72	1,51	2,08	0,50	0,36
α-ЛА-Тур*	0,492	0,567	0,416	0,378	0,605	0,454	0,529	0,227	0,265
β-ЛГ-Тур	0,772	0,958	0,878	0,639	0,958	0,798	0,852	0,133	0,133
БСА-Тур	0,168	0,121	0,129	0,118	0,136	0,075	0,104	0,025	0,018

*- концентрация йода, которая может связаться со всеми тирозиновыми остатками сывороточных белков

Список использованной литературы:

1. **Яшин, А.Н.** Актуальность разработки обогащенных микроэлементами продуктов питания для диетотерапии при сердечно-сосудистых заболеваниях / А.Н. Яшин, А.Н. Петров // Пищевые системы. 2023. № 3. С. 272–278. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-3-272-278>
2. **Барковская, И.А.** Дефицит йода в России: современное состояние проблемы, мировая практика и новые подходы к терапии / И.А. Барковская, А.Г. Кручинин, И.В. Рожкова // Пищевые системы. 2024. № 2. С. 238–245. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-2-238-245>
3. **Ефимова, Н.В.** Оценка риска здоровью и социально-экономических потерь, ассоциированных с неинфекционными алиментарно-зависимыми заболеваниями / Н.В. Ефимова, О.Г. Богданова // Анализ риска здоровью. 2024. № 2. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.2.07>
4. **Савина, А.А.** Тенденции показателей заболеваемости болезнями эндокринной системы взрослого населения Российской Федерации / А. А. Савина // Социальные аспекты здоровья населения. 2021. № 4. <https://doi.org/10.21045/2071-5021-2021-67-4-6>
5. **Трошина, Е.А.** Аутоиммунные и йододефицитные заболевания щитовидной железы как «вершина айсберга» полиорганной патологии / Е.А. Трошина // Терапевтический архив. 2024. № 10. С. 923–931. <https://doi.org/10.26442/00403660.2024.10.202855>
6. **Colgrave, M.L.** Perspectives on future protein production / M.L. Colgrave, S. Dominik, B.A. Tobin, R. Stockmann, C. Simon, C.A. Howitt et al. // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2021. № 50. P. 15076–15083. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c05989>
7. **Зобкова, З.С.** Внедрение и коммерциализация результатов научно-исследовательских работ в цельномолочной отрасли / З. С. Зобкова // Актуальные вопросы молочной промышленности. 2020. № 1. С. 199–204. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-199-204>
8. **Malézieux, E.** Biofortification versus diversification to fight micronutrient deficiencies: An interdisciplinary review / E. Malézieux, E.O. Verger, S. Avallone, A. Alpha, P.B. Ngigi, A. Lourme-Ruiz et al. // Food Security. 2024. № 16. С. 261–275. <https://doi.org/10.1007/s12571-023-01422-z>
9. **Бирюкова, З.А.** Сохранность йода в молоке при стерилизации и хранении / З.А. Бирюкова, О.Г. Пантелеева, Е.А. Юрова, А.Я. Гончарова // Молочная промышленность. 2014. № 10. С. 54–56.
10. **Wachowska, W.** Importance of iodine fortification in food production: Human health and technology / M. Wachowska, M. Adamczak // Journal of Elementology. 2023. № 1. С. 199–222. <https://doi.org/10.5601/jelem.2022.27.4.2342>
11. **Arias-Borrego, A.** Iodine deficiency disturbs the metabolic profile and elemental composition of human breast milk / A. Arias-Borrego, I. Velasco, J. L. Gómez-Ariza, T. García-Barrera // Food Chemistry. 2022. № 371. Article 131329. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131329>
12. **Bonofiglio, D.** Effects of iodine intake and nutraceuticals in thyroidology: Update and prospects / D. Bonofiglio, S. Catalano // Nutrients. 2020. № 12(5). Article 1491. <https://doi.org/10.3390/nu12051491>
13. **Gharibzahedi, S.M.T.** The importance of minerals in human nutrition: Bioavailability, food fortification, processing effects and nanoencapsulation / S.M.T. Gharibzahedi, S.M. Jafari // Trends in Food Science and Technology. 2017. № 62. С. 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.017>
14. **Евдокимов, И.А.** Современные аспекты производства деминерализованной молочной сыворотки / И.А. Евдокимов, Е.А. Юрова, А.Д. Лодыгин [и др.] // Пищевая индустрия: инновационные процессы, продукты и технологии. 2024. С. 199–204. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.3.3.015>
15. **Агаркова, Е.Ю.** Сыворотка. Краткий информационно-аналитический обзор / Е. Ю. Агаркова // Сыроделие и маслоделие. 2023. № 4. С. 81–82.
16. **Горбатова, К.К.** Биохимия молока и молочных продуктов / К. К. Горбатова. – Москва, 1980. – 272 с.
17. **Лескова, С.Ю.** Создание обогащенной белково-жировой эмульсии для мясopодуKтов / С.Ю. Лескова, М.Б. Данилов, Н.И. Гомбожапова // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 2. С. 55–61.
18. **Sirimulla, S.** Halogen interactions in protein–ligand complexes: implications of halogen bonding for rational drug design / S. Sirimulla, J. B. Bailey, R. Vegesna, M. Narayan // Journal of Chemical Information and Modeling. 2013. № 11. С. 2781–2791. <https://doi.org/10.1021/ci400257k>

19. **Попов, И.А.** Определение минимального цинк-связывающего центра природных изоформ домена 1–16 бета-амилоида методом ESI-MS / И.А. Попов, М.И. Индейкина, А.С. Кононихин, Н.Л. Стародубцева, С. А. Козин // Молекулярная биология. 2013. № 3. С. 498–498. <https://doi.org/10.7868/S0026898413020122>

20. **Сордонова Е.В.** Разработка и характеристика органических производных йода и цинка / Е.В. Сордонова, С.Д. Жамсаранова, Д.В. Лыгденов // Bulletin of the East Siberian State University of Technology / Vestnik VSGTU. 2018. № 2.

21. **Kruchinin, A.G.** Bioinformatic modeling (in silico) of obtaining bioactive peptides from the protein matrix of various types of milk whey / A.G. Kruchinin, E.I. Bolshakova, I.A. Barkovskaya // Fermentation. 2023. № 4. С. 380. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040380>

22. **Кручинин, А.Г.** Интегративный подход к классификации молочной сыворотки / А.Г. Кручинин, Е.И. Мельникова, И.А. Барковская // Сыроделие и маслоделие. 2024. № 1. С. 93–97. <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2024-1-7>