

## ОБЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОМ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВИТАМИНА D В ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ\* (обзор)

В.М. КОДЕНЦОВА<sup>1</sup>, Д.В. РИСНИК<sup>2</sup>, В.К. МАЗО<sup>3</sup>

Дефицит витамина D, который обнаруживается у 50-90 % взрослого и детского населения Российской Федерации (И.Н. Захарова с соавт., 2015; В.М. Коденцова с соавт., 2017, 2018) и вызван его недостаточным потреблением с пищей и сниженным эндогенным синтезом в коже вследствие малой инсоляции, ассоциируется со многими хроническими заболеваниями и остается серьезной проблемой (А. Hossein-nezhad с соавт., 2013). Один из вариантов биофортификации, получивший название «bio-addition», основан на способности живых организмов под действием УФ-облучения образовывать витамин D из эндогенного эргостерола. Образующийся в организме животных, грибов или дрожжей витамин D проходит стадии биотрансформации и в результате потребляется человеком в натуральном виде. Облучение животных ультрафиолетом позволяет минимизировать сезонные вариации концентрации витамина D в коровьем молоке (R.R. Weir с соавт., 2017). После пребывания свиней в течение 14 сут по 1 ч на солнце в летний полдень содержание витамина D<sub>3</sub> в мясе повышалось ( $p < 0,001$ ) до  $0,716 \pm 0,097$  мкг/100 г ( $28,6 \pm 3,9$  МЕ/100 г) и существенно превышало аналогичный показатель в контрольной группе ( $0,218 \pm 0,024$  мкг/100 г, или  $8,7 \pm 1,0$  МЕ/100 г) (D.E. Larson-Meyer с соавт., 2017). УФ-облучение эффективно увеличивало количество витамина D в мясе кур с 0,16 до 0,96 мкг/100 г даже на фоне потребления 3000 МЕ витамина D<sub>3</sub>/кг корма (А. Schutkowski с соавт., 2013). Количество витамина D<sub>2</sub>, образованного в оптимальных условиях УФ-облучения грибов шиитаке (*Lentinula edodes*), составляет  $29,87 \pm 1,38$  мкг/г сухой массы. В США, Ирландии, Нидерландах и Австралии свежие грибы подвергают УФ-облучению, это приводит к увеличению содержания витамина D<sub>2</sub> до 10 мкг/100 г сырой массы (О. Таофиқ с соавт., 2017; G. Cardwell с соавт., 2018), что составляет 50-100 % от рекомендуемой нормы потребления витамина. Обработка пекарских дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* ультрафиолетовым облучением индуцирует превращение содержащегося в них эргостерина в витамин D<sub>2</sub>. Количество витамина D<sub>2</sub> в среднем составляет 3065 тыс. МЕ/100 г (2560-3750 тыс. МЕ/100 г), или 770 мкг/г (640-940 мкг/г), что почти в 30-50 раз превышает его исходную концентрацию (менее 20 МЕ/100 г) (EFSA, 2014). Европейским агентством по безопасности продуктов питания (European Food Safety Authority, EFSA, Италия) обработанные ультрафиолетом дрожжи, обогащенные витамином D<sub>2</sub>, разрешены в качестве нового пищевого ингредиента при производстве дрожжевого хлеба, рулетов, мучной кондитерской продукции в максимальной дозе 5 мкг витамина D<sub>2</sub>/100 г. После облучения масла зародышей пшеницы (слой масла 1,6 мм) ультрафиолетом концентрация витаминов D<sub>2</sub> и D<sub>3</sub> составила соответственно 1035 и 37 нг/г (А.С. Ваг с соавт., 2016). Аналогичным образом происходит увеличение содержания витамина D в яйце при облучении кур ультрафиолетовым светом или свободном выгуле при естественном солнечном свете (А. Schutkowski с соавт., 2013; J. Kühn с соавт., 2014, 2015). В условиях полного отсутствия синтеза витаминов в нашей стране биофортификация витамином D куриного мяса, яиц и молочных продуктов посредством УФ-облучения животных, грибов и растительных масел приобретает важное значение.

Ключевые слова: витамин D, биофортификация, обогащение витамином D, куры, яйца, коровье молоко, грибы, масло зародышей пшеницы, пекарские дрожжи, УФ-облучение, инсоляция.

Обеспечение населения функциональными продуктами для сохранения и укрепления здоровья, а также профилактики заболеваний, обусловленных неполноценным и несбалансированным рационом, — одна из основных задач и современных мировых тенденций. Изучение взаимосвязи фактического питания и состояния здоровья свидетельствует о том, что адекватный энергетическим тратам рацион не соответствует потребностям человека в макро- и микронутриентах и минорных биологически активных веществах. Качество функционального пищевого продукта (ФПП) и оздоровительный эффект при его систематическом потреблении в решающей степени зависят от использованного пищевого сырья. Витаминная ценность относится к важнейшим характеристикам полезности пищевого сы-

\* Работа финансово поддержана РНФ, грант № 16-16-04047.

рья и получаемых на его основе ФПП, чем определяется актуальность исследований, ориентированных на повышение содержания витаминов в сельскохозяйственной продукции. Для улучшения обеспеченности витаминами их добавляют непосредственно в пищевые продукты массового потребления или к пищевому сырью (1). Однако в условиях, когда обогащение пищевых продуктов — это добровольная инициатива производителей, такие продукты поступают в торговую сеть в недостаточном количестве. Кроме того, среди населения, а иногда и в научной литературе, к сожалению, бытует неверное представление о том, что синтетические витамины плохо усваиваются организмом.

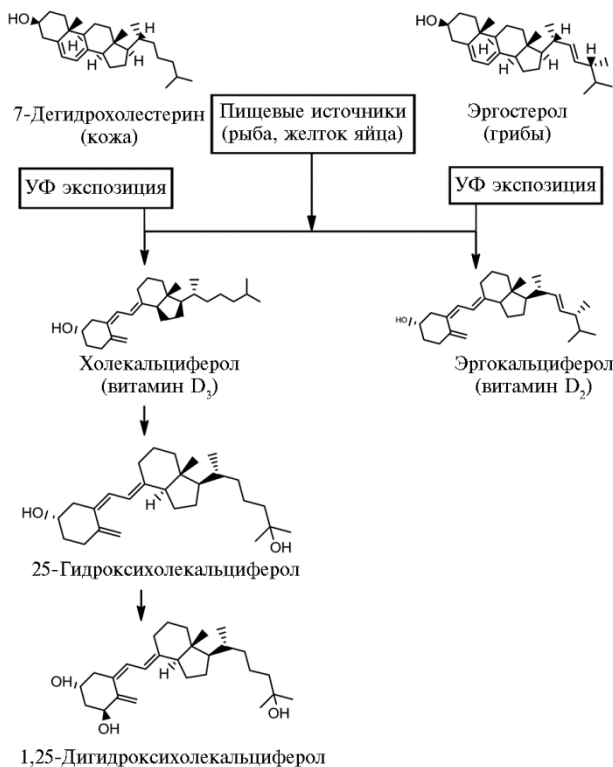
Биофортификация (biofortification) — современная интенсивно развивающаяся технология улучшения свойств пищевых продуктов по составу биологически значимых компонентов. В животноводстве и птицеводстве это достигается посредством добавления витаминов, минеральных веществ, полиненасыщенных жирных кислот в корма (2), в растениеводстве — методами традиционной и маркер-опосредованной селекции, биотехнологий и агротехнологий (3). Перспективный вариант биофортификации, получивший название «bio-addition», основан на способности живых организмов под действием УФ-облучения образовывать витамин D из эндогенного эргостерола или 7-дегидрохолестерина. Синтезируемый в организме животных, грибов или дрожжей витамин D проходит стадии биотрансформации и в результате потребляется человеком в натуральном виде.

В настоящем обзоре кратко представлены данные о возможностях повышения содержания витамина D в сельскохозяйственной продукции посредством облучения ультрафиолетовым светом (УФ-облучение).

Эссенциальность витамина D (как и других витаминов) для человеческого организма не вызывает сомнений. Витамины D, или кальциферолы, представлены двумя соединениями — холекальциферолом (витамин D<sub>3</sub>) и эргокальциферолом (витамин D<sub>2</sub>). Отличие витамина D от других витаминов заключается в том, что он не только поступает в организм с пищей, но и может образовываться в коже под воздействием ультрафиолетового облучения (рис.) (4, 5).

Основными источниками витамина D<sub>3</sub> в рационе человека (в порядке уменьшения содержания) служат печень трески, рыба, яйца, печень, сливочное масло (6). Помимо холекальциферола, значительный вклад в витаминную ценность мясных и молочных продуктов вносит 25-гидрокси-холекальциферол (25ОНD<sub>3</sub>). В пище растительного происхождения (водоросли, листья и плоды некоторых растений) витамин D содержится в чрезвычайно низких количествах (от 0,03 до 0,67 мкг/100 г сухого вещества) (7). В грибах присутствует витамин D<sub>2</sub>. Витамеры витамина D обладают разной биологической активностью для человека. Витамин D<sub>3</sub> эффективнее, чем D<sub>2</sub> (8, 9). Установлено, что по степени улучшения статуса по витамину D 10 мкг витамина D<sub>3</sub> эквивалентны 23 мкг витамина D<sub>2</sub> или 6,8 мкг 25ОНD<sub>3</sub> (10, 11).

Кальциферолы образуются в результате фотоизомеризации соответствующих провитаминов под действием ультрафиолетового излучения (см. рис.). Провитамин холекальциферола — 7-дегидрохолестерин синтезируется в организме наземных животных из холестерина; провитамин эргокальциферола, эргостерин, содержится в грибах и дрожжах (5). Холекальциферол образуется из 7-дегидрохолестерина при облучении кожи солнечным или искусственным ультрафиолетовым светом ( $\lambda = 280-320$  нм) в результате процесса, включающего фотохимическую модификацию 7-дегидрохолестерола, после чего следует неферментативная изомеризация.



**УФ-зависимый эндогенный синтез и метаболизм витамина D** (адаптировано по О. Таофиq с соавт.) (39).

D у населения, вызванный его недостаточным потреблением с пищей и/или сниженным эндогенным синтезом в коже вследствие дефицита инсоляции, имеет крайне нежелательные последствия для здоровья (1, 13, 14), что связано не только со скелетными, но и с нескелетными функциями (15). Недостаток витамина D коррелирует со многими хроническими заболеваниями — ассоциированными с возрастом (16), сердечно-сосудистыми (17), инфарктом миокарда, сахарным диабетом 2-го типа, туберкулезом, бронхиальной астмой, атопическим дерматитом, крапивницей, онкологическими заболеваниями простаты, молочной железы, кишечника, аутоиммунными заболеваниями (17), а также сопровождается нейрокогнитивными расстройствами, депрессивными состояниями, нарушением репродуктивной функции (12, 18, 19).

Согласно результатам исследований обеспеченности витаминами населения России, дефицит или недостаточность витамина D обнаруживается у 50-90 % взрослого и детского населения (4, 14, 20, 21). Эту проблему в некоторых странах (США, Великобритания, ФРГ, Италия, Бельгия, Финляндия) решают посредством законодательно регламентированного технологического обогащения пищевых продуктов массового потребления (22). В результате потребление 28-63 % витамина D (23). Доказана эффективность такого обогащения: сообщается о снижении числа остеопоротических переломов (24, 25) у населения и экономической выгоде (26, 27). Альтернативный способ повышения содержания витамина D в сельскохозяйственной продукции — облучение ультрафиолетовым светом (УФ-облучение).

Коровье молоко. Содержание витамина D в молоке зависит от поступления в организм коров эргокальциферола, содержащегося в

Считается, что до 80 % витамина D может синтезироваться в коже человека под действием ультрафиолетового излучения спектра В ( $\lambda = 290-315$  нм) (12). Однако в условиях нашей страны в силу недостаточного пребывания на солнце эндогенный синтез витамина D в коже не обеспечивает потребности организма в этом витамине.

После поступления в организм витамин D подвергается гидроксированию (см рис.), превращаясь сначала в 25-гидроксивитамин D (25ОНD), который циркулирует в крови (по нему оценивается обеспеченность этим витамином), а затем — в свою метаболически активную гормональную форму — 1,25-дигидрокси витамин D) (12).

Дефицит витамина

грибах, и холекальциферола из витаминных добавок, а также эндогенного синтеза в коже (28). В опытах с использованием попон и чехлов для вымени было показано, что, несмотря на шерстный покров кожи, синтез витамина D у коров осуществляется равномерно по всей поверхности тела (29). Хорошо известны сезонные колебания содержания витамина D в коровьем молоке, которые минимальны зимой (0-0,04 мкг/г жира) и максимальны летом (до 0,014 мкг/г жира) в период интенсивной инсоляции при пастбищном содержании (30). Естественная инсоляция более эффективна для улучшения статуса витамина D у животных по сравнению с добавлением в корма витамина D<sub>3</sub> или D<sub>2</sub> (29, 31). Искусственное УФ-облучение коров в течение 24 сут, имитирующее 1, 2, 3 или 4-часовое пребывание на солнце летом на 56° с. ш., приводило к увеличению содержания витамина D<sub>3</sub> и 25ОНD<sub>3</sub> в молоке (30, 32). Такое облучение позволяет минимизировать сезонные вариации концентрации витамина D в коровьем молоке.

Мясо животных. Эта продукция традиционно не рассматривается как важный источник витамина D для человека, но в последние годы появились сообщения о возможности ее прижизненной модификации.

Длина волны  $\lambda = 296$  нм оказалась оптимальной для эндогенного синтеза витамина D<sub>3</sub> в коже свиней. Максимальная доза 20 кДж/м<sup>2</sup> обеспечивает у них образование 3,5-4,0 мкг витамина D<sub>3</sub>/см<sup>2</sup> кожи (33). Установлено, что воздействие солнечного света на свиней приводит к увеличению содержания витамина D и в филейной части (34). Воздействие солнечного света повышало ( $p = 0,003$ ) содержание 25ОНD (более эффективной для человека формы) в мышечной ткани и подкожном жире, но не отражалось на количестве витамина D<sub>3</sub> ( $p = 0,56$ ). У свиней после пребывания в течение 14 сут по 1 ч на солнце в летний полдень содержание витамина D<sub>3</sub> в мясе возрастало ( $p < 0,001$ ) до  $0,716 \pm 0,097$  мкг/100 г ( $28,6 \pm 3,9$  МЕ/100 г), существенно превышая аналогичный показатель в контрольной группе ( $0,218 \pm 0,024$  мкг/100 г, или  $8,7 \pm 1,0$  МЕ/100 г) (34). Количество 25ОНD<sub>3</sub> достигало  $0,281 \pm 0,014$  против  $0,130 \pm 0,016$  мкг/100 г. Содержание общего витамина D (D<sub>3</sub> + 25ОНD<sub>3</sub>) в филейной части у свиней, которых подвергли УФ-облучению, повысилось в 2,9 раза ( $0,997 \pm 0,094$  против  $0,348 \pm 0,027$  мкг/100 г,  $p = 0,001$ ). Тот факт, что содержание витамина D<sub>3</sub> в подкожной жировой ткани при воздействии солнца не изменялось и было одинаковым у свиней, подвергшихся инсоляции, и животных из контрольной группы (при 2-кратном увеличении количества 25ОНD<sub>3</sub>), пока не получил объяснения (34). Пребывание на солнце приводило к улучшению обеспеченности свиней витамином D, оцениваемой по количеству 25ОНD<sub>3</sub> в сыворотке крови, даже при достаточном содержании этого витамина в рационе (35). Ежедневное УФ-облучение мини-свиней (соответствовало пребыванию на солнце в полдень в течение 10-20 мин) стимулировало кожный синтез витамина D<sub>3</sub> и приводило к увеличению количества витамина D<sub>3</sub> и 25ОНD<sub>3</sub> в сыворотке крови, а также в туше. Содержание витамина D<sub>3</sub> в жировой ткани у мини-свиней, подвергшихся воздействию ультрафиолета, составляло 150-260 нг/г, а у мини-свиней при пероральном введении витамина D<sub>3</sub> в дозе до 60 мкг витамина D<sub>3</sub>/сут, или 3,7-4,4 мкг/кг живой массы, — 90-150 нг/г (36). То есть УФ-облучение оказалось результативнее. На основании полученных данных был сделан вывод о том, что изменение условий свиноводства, позволяющих животным пребывать на солнечном свете, может быть эффективным средством естественного увеличения содержания витамина D в продуктах из свинины.

Аналогичные данные получены для других видов животных. Инсоляция улучшает обеспеченность крупного рогатого скота витамином D.

Так, в конце лета и осенью концентрация 25ОНD в сыворотке крови у телят существенно превышала этот показатель в начале июня (55,2-63,8 против 26,3 нг/мл) (37). Воздействие ультрафиолета В повышало количество витамина D в мышечной ткани кур в 4 раза эффективнее, чем их кормление рационом с максимально допустимым содержанием витамина D<sub>3</sub>. УФ-облучение увеличивало количество витамина D в мясе кур с 0,16 до 0,96 мкг/100 г даже при потреблении 3000 МЕ витамина D<sub>3</sub>/кг корма (38).

**Грибы.** Многие виды грибов содержат высокие концентрации эргостерола, который под действием УФ-облучения превращается в витамин D<sub>2</sub>. На образование витамина D<sub>2</sub> оказывают влияние температура, влажность, тип УФ-облучения (В или С), продолжительность и доза облучения (39-41). В таблице приведено содержание витамина D<sub>2</sub> в подвергнутых УФ-облучению свежесобранных и лиофилизированных грибах.

**Содержание витамина D<sub>2</sub> (мкг/г сухой массы) после УФ-облучения разных видов свежих и лиофилизированных грибов (M±SEM) (42-44)**

Грибы	Свежие	Лиофилизированные измельченные
Шиитаке ( <i>Lentinus edodes</i> )	29,46±2,21	60
Шампиньоны ( <i>Agaricus bisporus</i> )	3,55±0,11	119
Вешенка ( <i>Pleurotus ostreatus</i> )	58,96±1,15	34,6

Количество витамина D<sub>2</sub>, образованного в оптимальных условиях УФ-облучения грибов шиитаке (*Lentinula edodes*), составило 29,87±1,38 мкг/г сухой массы (45). Высушивание грибов шиитаке на солнце приводило к увеличению содержания в них витамина D<sub>2</sub> в 16 раз — со 100 до 1600 МЕ в 100 г (15). Оригинальным способом получения функционального пищевого компонента было получение экстракта грибов шиитаке с содержанием эргостерола 15 %, а затем перевод его в витамин D<sub>2</sub> под действием УФ-облучения при λ = 254 нм (6). Лиофилизированный экстракт шиитаке после УФ-облучения содержал около 37 мкг/г витамина D<sub>2</sub>, что превышало его исходное количество более чем в 6 раз. Экстракт может быть использован в качестве биологически активной добавки к пище, 0,4 г которой полностью обеспечивает суточную потребность человека в витамине D (46). Содержание витамина D<sub>2</sub> в плодовых телах грибов шести родов (*Agaricus*, *Agrocybe*, *Auricularia*, *Hypsizigus*, *Lentinula* и *Phooliota*) и пяти видов *Pleurotus*, облученных ультрафиолетом в течение 2 ч, значительно возросло — с 0-3,93 до 15,06-208,65 мкг/г (47). Максимальное содержание (204,7 мкг/г) было отмечено в вешенках. Высушивание предварительно нарезанных шампиньонов существенно повышало количество образующегося витамина D<sub>2</sub> при последующей УФ-обработке — до 406 против 45 мкг/г целых грибов (48). Облучение порошка сухих белых грибов при комнатной температуре в течение примерно 10 мин приводило к увеличению содержания витамина D<sub>2</sub> до 741,50±23,75 мкг/г (41).

В настоящее время в США, Ирландии, Нидерландах и Австралии свежие грибы подвергают УФ-облучению, что приводит к увеличению содержания витамина D<sub>2</sub> до 10 мкг/100 г сырой массы (43, 49). В результате порция грибов (100 г) обеспечивает потребление 50-100 % от рекомендуемой нормы этого витамина. По содержанию витамина D обработанные таким образом грибы приближаются к рыбе жирных сортов (50). Это имеет принципиальное значение для вегетарианцев, для которых вследствие отказа от потребления пищи животного происхождения типична недостаточная обеспеченность витамином D (51-53). Содержание витамина D<sub>2</sub> в шампиньонах при разных способах приготовления составляет 62-88 % от исходной (p ≤ 0,05) (54).

На крысах с экспериментальным дефицитом витамина D было по-

казано, что витамин D<sub>2</sub> из УФ-облученных грибов этими животными усваивается: количество 25ОНD и кальция в крови повышалось, а минеральная плотность костной ткани была значительно выше ( $p < 0,01$ ), чем в контрольной группе крыс, получавших обычные грибы (55).

В результате оценки биодоступности витамина D из грибов установлена его достаточно высокая усвояемость. Показано, что потребление грибов после их УФ-облучения приводило к увеличению концентрации 25ОНD<sub>2</sub> в сыворотке крови людей до 24,2 нмоль/л, особенно если исходно имела место недостаточность этого витамина. При этом, однако, отмечалось снижение количества 25ОНD<sub>3</sub> на 12,6 нмоль/л (44). Витамин D<sub>2</sub> из УФ-облученных измельченных лисичек и белых грибов хорошо абсорбируется, способствует повышению концентрации 25ОНD<sub>2</sub> и снижению количества 25ОНD<sub>3</sub> в сыворотке крови (56). Было установлено, что прием 2000 МЕ витамина D<sub>2</sub>, содержащегося в грибах, столь же эффективен для повышения и поддержания необходимого количества 25ОНD в крови человека, как и прием 2000 МЕ витамина D<sub>2</sub> или витамина D<sub>3</sub> (57).

Добавление в рацион телят в предубойный период грибов, обогащенных витамином D<sub>2</sub>, в течение 30 сут приводило к повышению содержания витамина D в мясе, хоть и менее выраженному, чем при обогащении рациона витамином D<sub>3</sub> (58).

Пекарские дрожжи. Воздействие ультрафиолетового облучения на пекарские дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* индуцировало превращение содержащегося в них эргостерола в витамин D<sub>2</sub> (см. рис.). Количество витамина D<sub>2</sub> почти в 30-50 раз превышало его исходную концентрацию (менее 20 МЕ/100 г) и в среднем составляло 3065 тыс. МЕ/100 г (колебания в пределах 2560-3750 тыс. МЕ/100 г), или 770 мкг/г (640-940 мкг/г) (59). В 2012 году Европейским агентством по безопасности продуктов питания (European Food Safety Authority, EFSA, Италия) УФ-обработанные дрожжи, обогащенные витамином D<sub>2</sub>, были разрешены в качестве нового пищевого ингредиента при производстве дрожжевого хлеба, рулетов, мучной кондитерской продукции (максимальная доза — 5 мкг/100 г продукта). Такие дрожжи также разрешены для использования в качестве компонента биологически активных добавок (БАД) к пище.

Потребление хлеба, изготовленного с использованием D<sub>2</sub>-обогащенных дрожжей, оказывало сопоставимый с чистым витамином D<sub>2</sub> эффект по влиянию на концентрацию 25ОНD в плазме крови у женщин (59). В эксперименте на животных было показано, что витамин D<sub>2</sub> из обогащенных УФ-облучением пекарских дрожжей, использованных при выпечке хлеба, усваивается и улучшает состояние костной ткани у крыс с исходным дефицитом витамина D (60). По действию на содержание 25ОНD в экспериментах на растущих крысах эффективность используемой формы витамина D уменьшалась в ряду витамин D<sub>3</sub> > витамин D<sub>2</sub> > УФ-обработанные дрожжевые клетки или их отдельные фракции (61).

В Канаде разрешено добавление в дрожжевые хлебобулочные изделия витамин D<sub>2</sub>-содержащих дрожжей в количестве до 90 МЕ (2,25 мкг) витамина D<sub>2</sub>/100 г продукта, что составляет 23 % от рекомендуемой нормы потребления (62). В США в 2012 году в законодательство были внесены поправки, обеспечивающие безопасное использование витамина D<sub>2</sub> из пекарских дрожжей при выпечке дрожжевых хлебобулочных изделий: допустимо внесение не более 400 МЕ витамина D<sub>2</sub>/100 г готовой продукции, или 50 % от рекомендуемой нормы потребления (63). Внимание к пищевым дрожжам как потенциальному источнику биологически активных веществ сохраняется (64).

Растительные масла. Потенциальным источником витамина D могут также служить растительные масла. Они содержат значительные количества не только эргостерола, но и 7-дегидрохолестерина (7-DHC) (65). Количество эргостерола в масле зародышей пшеницы составляет 22,1-34,2, в масле авокадо — 4,2-23,4, в подсолнечном — 7,9-17,4, в рапсовом, соевом, льняном — 4,1-9,5, в оливковом — < 4,5 мкг/г. Воздействие УФ-облучения приводило к частичной конверсии эргостерола и 7-DHC в витамин D<sub>2</sub> и D<sub>3</sub> в этих маслах (65). После 1-минутного УФ-облучения масла зародышей пшеницы (слой масла 1,6 мм) концентрация витамин D<sub>2</sub> и D<sub>3</sub> составила соответственно 1035 и 37 нг/г (65). При этом такое воздействие практически не снижало содержания токоферолов и не приводило к интенсификации перекисного окисления (65). Оценка биодоступности витамина D показала, что у мышей с его исходным дефицитом происходило улучшение статуса по витамину D, что подтверждалось увеличением концентрации 25ОНD в плазме крови и накоплением в печени по сравнению с показателями у мышей, получавших обычное масло зародышей пшеницы. Однако содержание в плазме крови 25ОНD у мышей, которым скармливали УФ-обработанное масло, не достигало значений, наблюдаемых в группе, потреблявшей масло с добавленным чистым витамином D (65).

Куриное яйцо. Обогащение яиц витамином D вместо добавления его в корм кур можно достичь, искусственно облучая птиц ультрафиолетом (bio-addition), или посредством свободного выгула птицы.

В яйце, полученном от кур-несушек, облучаемых ультрафиолетом по 3 ч ежедневно в течение 4 нед на фоне рациона с адекватным содержанием витамина D<sub>3</sub> (3000 МЕ/кг корма), количество витамина D обычно достигает 2,5 мкг в форме холекальциферола и 25ОНD. Оно почти в 5 раз превышает аналогичный показатель в яйцах кур, получавших ту же диету, но не подвергавшихся УФ-облучению (38). Любопытно, что эндогенное образование витамина происходит в основном в ногах кур, где оперение наименьшее. Зависимость увеличения содержания витамина D в яичном желтке от времени ежедневного УФ-облучения носит нелинейный характер. При ежедневном воздействии ультрафиолета в течение 300 мин содержание витамина D<sub>3</sub> повышалось до 28,6 мкг/100 г сухого вещества яичного желтка, но не достигало плато, тогда как количество 25ОНD становилось максимальным уже при облучении в течение 60 мин (66).

К аналогичному увеличению содержания витамина D приводит и естественная инсоляция. Количество витамина D<sub>3</sub> в яичном желтке в группах птиц, которые подвергались воздействию солнечного света (открытый и закрытый/открытый способ содержания), в 3-4 раза ( $p < 0,001$ ) превышало его накопление в яичном желтке кур, находившихся в закрытом помещении (67). Концентрация витамина D<sub>3</sub> в яичном желтке у птиц на свободном выгуле составляла 14,3 мкг/100 г против 3,8 мкг/100 г сухого вещества. Содержание витамина D в желтке куриных яиц птиц при содержании по смешанному типу заняло промежуточное положение. Количество 25ОНD<sub>3</sub> в яичном желтке тоже зависело от воздействия солнечных лучей, хотя и было меньшим, чем концентрация витамина D<sub>3</sub> ( $p < 0,05$ ).

Следует обратить внимание, что в последние годы происходит своего рода реабилитация куриного яйца. Показано, что потребление от 6 до 12 яиц в неделю в составе сбалансированных рационов не оказывает отрицательного влияния на основные факторы риска в отношении сердечно-сосудистых заболеваний и диабета 2-го типа (68). При анализе питания 7216 участников 55-80 лет было установлено, что умеренное потребление яиц не связано с повышенным риском сердечно-сосудистых заболеваний

как у пациентов с диабетом, так и без диабета (69). Кроме того, одновременное потребление приготовленных целых яиц с салатом из свежих овощей служит эффективным способом увеличения абсорбции  $\alpha$ -токоферола и  $\gamma$ -токоферола, а также каротиноидов из растительной пищи (70, 71).

Адекватная обеспеченность витамином D<sub>3</sub> имеет существенное значение для поддержания здоровья населения. В последние годы во многих странах применяют технологическое обогащение пищевой продукции масового потребления (йогурты, хлеб и т.д.) (27, 72, 73). В связи с обсуждением роли биофортификации отметим, что в нашей стране полностью отсутствует синтез субстанций витаминов. Потребности пищевой промышленности, медицины и сельского хозяйства в субстанциях витаминов обеспечиваются только за счет импорта (72).

Таким образом, использование альтернативных способов обогащения пищевой продукции витамином D представляется жизненно важным, в определенной степени способствующим решению проблемы импортозамещения. Перспективна биофортификация куриного мяса, свинины, яиц и молочных продуктов витамином D посредством УФ-облучения животных. До сих пор растительным источникам витамина D не придавалось должного значения, однако с учетом возможности увеличения содержания витамина D в грибах и растительных маслах с помощью УФ-облучения представляется целесообразным развивать и это направление получения продуктов, важных для питания вегетарианцев.

*1ФГБУН Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи,* Поступила в редакцию  
30 января 2019 года

119240 Россия, г. Москва, Устьинский пр., 2/4,  
e-mail: kodentsova@ion.ru ✉;

*2ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,*

119234 Россия, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, 1, стр. 12,  
Биологический факультет МГУ,  
e-mail: biant3@mail.ru;

*3Всероссийский НИИ птицеперерабатывающей промышленности — филиал ФГБНУ ФНЦ Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства РАН,*

141552 Россия, Московская обл., Солнечногорский р-н,  
рп. Ржавки, стр. 1,  
e-mail: mazo@ion.ru

*Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2019, V. 54, № 4, pp. 693-704

## ULTRAVIOLET IRRADIATION TO ENRICH FOODS WITH VITAMIN D (review)

*V.M. Kodentsova<sup>1</sup>, D.V. Risnik<sup>2</sup>, V.K. Mazo<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 2/14, Ust'yinskii per., Moscow, 109240 Russia, e-mail kodentsova@ion.ru (✉ corresponding author);*

*<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, 1-12, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia, e-mail biant3@mail.ru;*

*<sup>3</sup>All-Russian Research Institute of Poultry Processing Industry — Branch of Federal Scientific Center All-Russian Research and Technological Poultry Institute RAS, 1, Rzhavki, Solnechnogorsk Region, Moscow Province, 141552 Russia, e-mail mazo@ion.ru*

ORCID:

Kodentsova V.M. [orcid.org/0000-0002-5288-1132](https://orcid.org/0000-0002-5288-1132)

Mazo V.K. [orcid.org/0000-0002-3237-7967](https://orcid.org/0000-0002-3237-7967)

Risnik D.V. [orcid.org/0000-0002-3389-8115](https://orcid.org/0000-0002-3389-8115)

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported financially by Russian Science Foundation, grant No. 16-16-04047

Received January 30, 2019

doi: 10.15389/agrobiol.2019.4.693eng



## Abstract

Vitamin D deficiency found in 50-90 % of the adult and children's population in Russia (I.N. Zakharova et al., 2015; V.M. Kodentsova et al., 2017, 2018) and caused by inadequate intake and reduced endogenous synthesis in the skin due to insufficient solar irradiation, is associated with many chronic diseases and makes an important problem (A. Hossein-nezhad et al., 2013). One of the options for biofortification, called "bio-addition", is based on the ability of living organisms to form vitamin D from endogenous ergosterol by UV irradiation. Ultraviolet irradiation of animals allows minimizing seasonal variations in the concentration of vitamin D in cow's milk (R.R. Weir et al., 2017). A one-hour exposure of animals for 14-day to insolation at summer noon increased the vitamin D<sub>3</sub> content in pork ( $p < 0.001$ ) to  $0.716 \pm 0.097 \mu\text{g}/100 \text{ g}$  ( $28.6 \pm 3.9 \text{ IU}/100 \text{ g}$ ) which significantly exceeded the same indicator in the control animals ( $0.218 \pm 0.024 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ , or  $8.7 \pm 1.0 \text{ IU}$  per 100 g) (D.E. Larson-Meyer et al., 2017). UV irradiation effectively increased vitamin D level in chicken, from 0.16 to 0.96  $\mu\text{g}$  per 100 g, even at 3000 IU/kg of dietary vitamin D<sub>3</sub> (A. Schutkowski et al., 2013). The amount of vitamin D<sub>2</sub> in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) can achieve, under optimal conditions of UV irradiation,  $29.87 \pm 1.38 \mu\text{g}$  per g dry weight. In the USA, Ireland, the Netherlands and Australia, fresh mushrooms are exposed to UV irradiation, which leads to an increase in the vitamin D<sub>2</sub> content to 10  $\mu\text{g}/100 \text{ g}$  wet weight (O. Taofiq et al., 2017; G. Cardwell et al., 2018). This is 50-100 % of the recommended daily consumption of the vitamin. The processing of baking yeast *Saccharomyces cerevisiae* by ultraviolet irradiation induces the conversion of ergosterol into vitamin D<sub>2</sub>. The average content of vitamin D<sub>2</sub> is 3,065,417 IU/100 g (2,560,000-3,750,000 IU/100 g) or 770  $\mu\text{g}/\text{g}$  (640-940  $\mu\text{g}/\text{g}$ ), which increases its initial concentration (less than 20 IU of vitamin D<sub>2</sub>/100 g) almost 30-50-fold (EFSA, 2014). The vitamin D<sub>2</sub>-enriched UV-treated yeast is allowed by The European Food Safety Authority (EFSA) for fortification of yeast-leavened bread, rolls and fine pastry at maximum D<sub>2</sub> dose of 5  $\mu\text{g}$  per 100 g of the products. The concentration of vitamins D<sub>2</sub> and D<sub>3</sub> after UV irradiating of the wheat germ oil (1.6 mm oil layer) was 1035 and 37 ng/g, respectively (A.C. Baur et al., 2016). Similarly, there is an increase of the vitamin D content in eggs after exposure of chickens to UV irradiation or natural sunlight (A. Schutkowski et al., 2013; J. Kühn et al., 2014, 2015). In the conditions of the complete absence of the commercial production of vitamins in our country, bio-addition with vitamin D of chicken meat, eggs and dairy products by UV irradiation of animals, mushrooms, yeast, vegetable oils takes on particular significance.

Keywords: vitamin D, biofortification, bio-addition, poultry, eggs, cows' milk, mushrooms, vitamin D-enriched UV-treated baker's yeast, ultraviolet light irradiation, wheat germ oil.

## REFERENCES

1. Kodentsova V.M., Risnik D.V. *Voprosy dietologii*, 2017, 7(2): 33-40 (doi: 10.20953/2224-5448-2017-2-33-40) (in Russ.).
2. Kavtarashvili A.Sh., Mazo V.K., Kodentsova V.M., Risnik D.V., Stefanova I.L. Biofortification of hen eggs: vitamins and carotenoids (review). *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2017, 52(6): 1094-1104 (doi: 10.15389/agrobiology.2017.6.1094eng).
3. Garg M., Sharma N., Sharma S., Kapoor P., Kumar A., Chunduri V., Arora P. Biofortified crops generated by breeding, agronomy, and transgenic approaches are improving lives of millions of people around the world. *Front. Nutr.*, 2018, 5: 12 (doi: 10.3389/fnut.2018.00012).
4. Kodentsova V.M., Mendel' O.I., Khotimchenko S.A., Baturin A.K., Nikityuk D.B., Tutel'yan V.A. *Voprosy pitaniya*, 2017, 86(2): 47-62 (doi: 10.24411/0042-8833-2017-00067) (in Russ.).
5. Göring H. Vitamin D in nature: a product of synthesis and/or degradation of cell membrane components. *Biochemistry* (Moscow), 2018, 83(11): 1350-1357 (doi: 10.1134/S0006297918110056).
6. Schmid A., Walther B. Natural vitamin D content in animal products. *Advances in Nutrition*, 2013, 4(4): 453-462 (doi: 10.3945/an.113.003780).
7. Hughes L.J., Black L.J., Sherriff J.L., Dunlop E., Strobel N., Lucas R.M., Bornman J.F. Vitamin D content of Australian native food plants and Australian-grown edible seaweed. *Nutrients*, 2018, 10(7): 876 (doi: 10.3390/nu10070876).
8. Guo J., Lovegrove J.A., Givens D.I. 25(OH)D<sub>3</sub>-enriched or fortified foods are more efficient at tackling inadequate vitamin D status than vitamin D<sub>3</sub>. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2018, 77(3): 282-291 (doi: 10.1017/S0029665117004062).
9. Tripkovic L., Lambert H., Hart K., Smith C.P., Bucca G., Penson S., Chope G., Hipponen E., Berry J., Vieth R., Lanham-New S. Comparison of vitamin D<sub>2</sub> and vitamin D<sub>3</sub> supplementation in raising serum 25 hydroxyvitamin D status: a systematic review and meta analysis. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2012, 95(6): 1357-1364 (doi: 10.3945/ajcn.111.031070).
10. Jakobsen J., Andersen E., Christensen T., Andersen R., Bügel S. Vitamin D vitamers affect vitamin D status differently in young healthy males. *Nutrients*, 2018, 10(1): 2 (doi: 10.3390/nu10010012).
11. Wilson L.R., Tripkovic L., Hart K.H., Lanham-New S.A. Vitamin D deficiency as a public health issue: using vitamin D<sub>2</sub> or vitamin D<sub>3</sub> in future fortification strategies. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2017, 76(3): 392-399 (doi: 10.1017/S0029665117000349).

12. Hossein-nezhad A., Holick M.F. Vitamin D for health: A global perspective. *Mayo Clinic Proceedings*, 2013, 88(7): 720-755 (doi: 10.1016/j.mayocp.2013.05.011).
13. Kodentsova V.M., Risnik D.V. V sbornike: *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Tom 1: Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem* [In: Ecology. Economy. Computer science. Vol. 1: System analysis and modeling of economic and environmental systems]. Rostov-na-Donu, 2016: 486-498 (in Russ.).
14. Zakharova I.N., Mal'tsev S.V., Borovik T.E., Yatsyk G.V., Malyavskaya S.I., Vakhlova I.V., Shumatova T.A., Romantsova E.B., Romanyuk F.P., Klimov L.Ya., Pirozhkova N.I., Kolesnikova S.M., Kur'yaninova V.A., Tvorogova T.M., Vasil'eva S.V., Mozhukhina M.V., Evseeva E.A. *Pediatriya. Zhurnal im. G.N. Speranskogo*, 2015, 94(1): 62-67 (in Russ.).
15. Wacker M., Holick M.F. Vitamin D — effects on skeletal and extraskeletal health and the need for supplementation. *Nutrients*, 2013, 5(1): 111-148 (doi: 10.3390/nu5010111).
16. Drapkina O.M., Shepel' R.N., Fomin V.V., Svistunov A.A. *Terapevticheskii arkhiv*, 2018, 90(1): 69-75 (in Russ.).
17. Podzolkov V.I., Pokrovskaya A.E., Panasenko O.I. *Terapevticheskii arkhiv*, 2018, 90(9): 144-150 (in Russ.).
18. Kalinchenko S.Yu., Korotkova N.A. *Voprosy dietologii*, 2018, 8(2): 32-37 (doi: 10.20953/2224-5448-2018-2-32-37) (in Russ.).
19. Zaidieva Ya.Z. *Sovremennaya ginekologiya*, 2018, 1(6): 24-33 (in Russ.).
20. Kodentsova V.M., Beketova N.A., Nikityuk D.B., Tutel'yan V.A. *Profilakticheskaya meditsina*, 2018, 21(4): 32-37 (doi: 10.17116/profmed201821432) (in Russ.).
21. Zakharova I.N., Tvorogova T.M., Gromova O.A., Evseeva E.A., Lazareva S.I., Maikova I.D., Sugyan N.G. *Pediatricheskaya farmakologiya*, 2015, 12(5): 528-531 (doi: 10.15690/pf.v12i5.1453) (in Russ.).
22. Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A. *Voprosy pitaniya*, 2016, 85(2): 31-50 (in Russ.).
23. Itkonen S.T., Erkkola M., Lamberg-Allardt C.J.E. Vitamin D fortification of fluid milk products and their contribution to vitamin D intake and vitamin D status in observational studies — a review. *Nutrients*, 2018, 10(8): 1054 (doi: 10.3390/nu10081054).
24. Hilgsmann M., Burlet N., Fardellone P., Al-Daghri N., Reginster J.-Y. Public health impact and economic evaluation of vitamin D-fortified dairy products for fracture prevention in France. *Osteoporosis International*, 2017, 28(3): 833-840 (doi: 10.1007/s00198-016-3786-1).
25. Raulio S., Erlund L., Männistö S., Sarlio-Lähteenkorva S., Sundvall J., Tapanainen H., Virtanen S.M. Successful nutrition policy: improvement of vitamin D intake and status in Finnish adults over the last decade. *European Journal of Public Health*, 2016, 27(2): 268-273 (doi: 10.1093/eurpub/ckw154).
26. Jämskeläinen T., Itkonen S.T., Lundqvist A., Erkkola M., Koskela T., Lakkala K., Dowling K.G., Hull G.L., Kröger H., Karppinen J., Kyllönen E., Härkänen T., Cashman K.D., Männistö S., Lamberg-Allardt C. The positive impact of general vitamin D food fortification policy on vitamin D status in a representative adult Finnish population: evidence from an 11-y follow-up based on standardized 25-hydroxyvitamin D data. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2017, 105(6): 1512-1520 (doi: 10.3945/ajcn.116.151415).
27. Pilz S., März W., Cashman K.D., Kiely M.E., Holick M.F., Grant W.B., Pludowski P., Hilgsmann M., Trummer C., Schwetz V., Lerchbaum E., Pandis M., Tomaschitz A., Grubler M.R., Gaksch M., Verheyen N., Hollis B.W., Rejnmark L., Karras S.N., Hahn A., Bischoff-Ferrari H.A., Reichrath J., Jorde R., Elmadfa I., Vieth R., Scragg R., Calvo M.S., van Schoor N.M., Bouillon R., Lips P., Itkonen S.T., Martineau A.R., Lamberg-Allardt C., Zittermann A. Rationale and plan for vitamin D food fortification: a review and guidance paper. *Front. Endocrinol.*, 2018, 9: 373 (doi: 10.3389/fendo.2018.00373).
28. Hymøller L., Jensen S.K. Plasma transport of ergocalciferol and cholecalciferol and their 25-hydroxylated metabolites in dairy cows. *Domestic Animal Endocrinology*, 2017, 59: 44-52 (doi: 10.1016/j.domaniend.2016.11.002).
29. Hymøller L., Jensen S.K. Vitamin D<sub>3</sub> synthesis in the entire skin surface of dairy cows despite hair coverage. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(5): 2025-2029 (doi: 10.3168/jds.2009-2991).
30. Weir R.R., Strain J.J., Johnston M., Lowis C., Fearon A.M., Stewart S., Pourshahidi L.K. Environmental and genetic factors influence the vitamin D content of cows' milk. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2017, 76(1): 76-82 (doi: 10.1017/S0029665116000811).
31. Yue Y., Hymøller L., Jensen S.K., Lauridsen C. Effect of vitamin D treatments on plasma metabolism and immune parameters of healthy dairy cows. *Archives of Animal Nutrition*, 2018, 72(3): 205-220 (doi: 10.1080/1745039X.2018.1448564).
32. Jakobsen J., Jensen S.K., Hymøller L., Andersen E.W., Kaas P., Burild A., Jäpelt R.B. Short communication: artificial ultraviolet B light exposure increases vitamin D levels in cow plasma and milk. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(9): 6492-6498 (doi: 10.3168/jds.2014-9277).
33. Barnkob L.L., Argyraki A., Petersen P.M., Jakobsen J. Investigation of the effect of UV-LED exposure conditions on the production of vitamin D in pig skin. *Food Chemistry*, 2016, 212: 386-391 (doi: 10.1016/j.foodchem.2016.05.155).

34. Larson-Meyer D.E., Ingold B.C., Fensterseifer S.R., Austin K.J., Wechsler P.J., Hollis B.W., Makowski A.J., Alexander B.M. Sun exposure in pigs increases the vitamin D nutritional quality of pork. *PLoS ONE*, 2017, 12(11): e0187877 (doi: 10.1371/journal.pone.0187877).
35. Alexander B.M., Ingold B.C., Young J.L., Fensterseifer S.R., Wechsler P.J., Austin K.J., Larson-Meyer D.E. Sunlight exposure increases vitamin D sufficiency in growing pigs fed a diet formulated to exceed requirements. *Domestic Animal Endocrinology*, 2017, 59: 37-43 (doi: 10.1016/j.domaniend.2016.10.006).
36. Burild A., Frandsen H.L., Poulsen M., Jakobsen J. Tissue content of vitamin D<sub>3</sub> and 25-hydroxy vitamin D<sub>3</sub> in minipigs after cutaneous synthesis, supplementation and deprivation of vitamin D<sub>3</sub>. *Steroids*, 2015, 98: 72-79 (doi: 10.1016/j.steroids.2015.02.017).
37. Casas E., Lippolis J.D., Kuehn L.A., Reinhardt T.A. Seasonal variation in vitamin D status of beef cattle reared in the central United States. *Domestic Animal Endocrinology*, 2015, 52: 71-74 (doi: 10.1016/j.domaniend.2015.03.003).
38. Schutkowski A., Krämer J., Kluge H., Hirche F., Krombholz A., Theumer T., Stangl G.I. UVB exposure of farm animals: study on a food-based strategy to bridge the gap between current vitamin D intakes and dietary targets. *PLoS ONE*, 2013, 8(7): e69418 (doi: 10.1371/journal.pone.0069418).
39. Taofiq O., Fernandes B., Barros L., Barreiro M.F., Ferreira I.C. UV-irradiated mushrooms as a source of vitamin D<sub>2</sub>: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 70: 82-94 (doi: 10.1016/j.tifs.2017.10.008).
40. Edward T.L., Kirui M.S.K., Omolo J.O., Ngumbu R.G., Odhiambo P.M. Change in concentration of vitamin D 2 in oyster mushrooms exposed to 254nm and 365nm UV-light during growth. *International Journal of Biochemistry and Biophysics*, 2015, 3(1): 1-5.
41. Lee N.K., Aan B.Y. Optimization of ergosterol to vitamin D<sub>2</sub> synthesis in *Agaricus bisporus* powder using ultraviolet-B radiation. *Food Science and Biotechnology*, 2016, 25(6): 1627-1631 (doi: 10.1007/s10068-016-0250-0).
42. Slawinska A., Fornal E., Radzki W., Jablonska-Rys E., Parfeniuk E. Vitamin D<sub>2</sub> stability during the refrigerated storage of ultraviolet B-treated cultivated culinary-medicinal mushrooms. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2017, 19(3): 249-255 (doi: 10.1615/IntJMedMushrooms.v19.i3.70).
43. Cardwell G., Bornman J.F., James A.P., Black L.J. A review of mushrooms as a potential source of dietary vitamin D. *Nutrients*, 2018, 10(10): E1498 (doi: 10.3390/nu10101498).
44. Cashman K.D., Kiely M., Seamans K.M., Urbain P. Effect of ultraviolet light-exposed mushrooms on vitamin D status: liquid chromatography-tandem mass spectrometry reanalysis of biobanked sera from a randomized controlled trial and a systematic review plus meta-analysis. *The Journal of Nutrition*, 2016, 146(3): 565-75 (doi: 10.3945/jn.115.223784).
45. Won D.J., Kim S.Y., Jang C.H., Lee J.S., Ko J.A., Park H.J. Optimization of UV irradiation conditions for the vitamin D<sub>2</sub>-fortified shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using response surface methodology. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 27(2): 417-424 (doi: 10.1007/s10068-017-0266-0).
46. Chien R.C., Yang S.C., Lin L.M., Mau J.L. Anti-inflammatory and antioxidant properties of pulsed light irradiated *Lentinula edodes*. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(4): e13045 (doi: 10.1111/jfpp.13045).
47. Morales D., Gil-Ramirez A., Smiderle F.R., Piris A.J., Ruiz-Rodriguez A., Soler-Rivas C. Vitamin D-enriched extracts obtained from shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) by supercritical fluid extraction and UV-irradiation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 41: 330-336 (doi: 10.1016/j.ifset.2017.04.008).
48. Nolle N., Argyropoulos D., Ambacher S., Müller J., Biesalski H.K. Vitamin D<sub>2</sub> enrichment in mushrooms by natural or artificial UV-light during drying. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 85(part B): 400-404 (doi: 10.1016/j.lwt.2016.11.072).
49. Calvo M.S., Whiting S.J. Survey of current vitamin D food fortification practices in the United States and Canada. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 2013, 136: 211-213 (doi: 10.1016/j.jsbmb.2012.09.034).
50. *Khimicheskii sostav rossiiskikh pishchevykh produktov /Pod redaktsiei I.M. Skurikhina, V.A. Tutel'yana [Chemical composition of foodstuffs produced in Russia. I.M. Skurikhin, V.A. Tutel'yan (eds.)]. Moscow, 2002 (in Russ.)*.
51. Laskowska-Klita T., Chelchowska M., Ambroszkiewicz J., Gajewska J., Klemarczyk W. The effect of vegetarian diet on selected essential nutrients in children. *Medycyna Wieku Rozwojowego*, 2011, 15(3): 318-325.
52. Elorinne A.L., Alfthan G., Erlund I., Kivimäki H., Paju A., Salminen I., Turpeinen U., Voutilainen S., Laakso J. Food and nutrient intake and nutritional status of Finnish vegans and non-vegetarians. *PLoS ONE*, 2016, 11(2): e0148235 (doi: 10.1371/journal.pone.0148235).
53. Gorbachev D.O., Sazonova O.V., Gil'miyarova F.N., Gussyakova O.A., Myakisheva Yu.V., Beketova N.A., Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A., Gorbacheva I.V., Gavryushin M.Yu. *Profilakticheskaya meditsina*, 2018, 21(3): 51-56 (doi: 10.17116/profmed201821351) (in Russ.).
54. Ložnjak P., Jakobsen J. Stability of vitamin D<sub>3</sub> and vitamin D<sub>2</sub> in oil, fish and mushrooms after household cooking. *Food Chemistry*, 2018, 254: 144-149 (doi: 10.1016/j.foodchem.2018.01.182).
55. Jasinghe V.J., Perera C.O., Barlow P.J. Bioavailability of vitamin D<sub>2</sub> from irradiated mushrooms:

- an in vivo study. *British Journal of Nutrition*, 2005, 93(6): 951-955 (doi: 10.1079/BJN20051416).
56. Stephensen C.B., Zerofsky M., Burnett D.J., Lin Y.P., Hammock B.D., Hall L.M., McHugh T. Ergocalciferol from mushrooms or supplements consumed with a standard meal increases 25-hydroxyergocalciferol but decreases 25-hydroxycholecalciferol in the serum of healthy adults. *The Journal of Nutrition*, 2012, 142(7): 1246-1252 (doi: 10.3945/jn.112.159764).
  57. Keegan R.-J.H., Lu Z., Bogusz J.M., Williams J.E., Holick M.F. Photobiology of vitamin D in mushrooms and its bioavailability in humans. *Dermato-Endocrinology*, 2013, 5(1): 165-176 (doi: 10.4161/derm.23321).
  58. Duffy S.K., O'Doherty J.V., Rajauria G., Clarke L.C., Hayes A., Dowling K.G., O'Grady M.N., Kerry J.P., Jakobsen J., Cashman K.D., Kelly A.K. Vitamin D-biofortified beef: A comparison of cholecalciferol with synthetic versus UVB-mushroom-derived ergosterol as feed source. *Food Chemistry*, 2018, 256: 18-24 (doi: 10.1016/j.foodchem.2018.02.099).
  59. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies). Scientific opinion on the safety of vitamin D-enriched UV-treated baker's yeast. *EFSA Journal*, 2014, 12(1): 3520 (doi: 10.2903/j.efsa.2014.3520).
  60. Hohman E.E., Martin B.R., Lachcik P.J., Gordon D.T., Fleet J.C., Weaver C.M. Bioavailability and efficacy of vitamin D<sub>2</sub> from UV-irradiated yeast in growing, vitamin D-deficient rats. *J. Agric. Food Chem.*, 2011, 59(6): 2341-2346 (doi: 10.1021/jf104679c).
  61. Itkonen S.T., Pajula E.T., Dowling K.G., Hull G.L., Cashman K.D., Lamberg-Allardt C.J. Poor bioavailability of vitamin D<sub>2</sub> from ultraviolet-irradiated D<sub>2</sub>-rich yeast in rats. *Nutrition Research*, 2018, 59: 36-43 (doi: 10.1016/j.nutres.2018.07.008).
  62. Health Canada. Department of health, food and drugs regulation — Amendments. *Canada Gazette Part I*, 19 February, 2011: 439-440.
  63. FDA (Food and Drug Administration). *Food and drug administration, Department of health and human services. Food additives permitted for direct addition to food for human consumption; vitamin D<sub>2</sub> baker's yeast. Federal Register 08/29/2012.* Available <http://federalregister.gov/a/2012-21353>. Accessed 12.08.2019.
  64. Shurson G.C. Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses, and quantification methods. *Animal Feed Science and Technology*, 2018, 235: 60-76 (doi: 10.1016/j.anifeedsci.2017.11.010).
  65. Baur A.C., Brandsch C., König B., Hirche F., Stangl G.I. Plant oils as potential sources of vitamin D. *Frontiers in Nutrition*, 2016, 12(3): 29 (doi: 10.3389/fnut.2016.00029).
  66. Kühn J., Schutkowski A., Hirche F., Baur A.C., Mielenz N., Stangl G.I. Non-linear increase of vitamin D content in eggs from chicks treated with increasing exposure times of ultraviolet light. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 2015, 148: 7-13 (doi: 10.1016/j.jsbmb.2014.10.015).
  67. Kühn J., Schutkowski A., Kluge H., Hirche F., Stangl G.I. Free-range farming: a natural alternative to produce vitamin D-enriched eggs. *Nutrition*, 2014, 30(4): 481-484 (doi: 10.1016/j.nut.2013.10.002).
  68. Richard C., Cristall L., Fleming E., Lewis E.D., Ricupero M., Jacobs R.L., Field C.J. Impact of egg consumption on cardiovascular risk factors in individuals with type 2 diabetes and at risk for developing diabetes: a systematic review of randomized nutritional intervention studies. *Canadian Journal of Diabetes*, 2017, 41(4): 453-463 (doi: 10.1016/j.jcjd.2016.12.002).
  69. Diez-Espino J., Basterra-Gortari F.J., Salas-Salvado J., Buil-Cosiales P., Corella D., Schröder H., Estruch R., Ros E., Gómez-Gracia E., Arós F., Fiol M., Lapetra J., Serra-Majem L., Pintó X., Babio N., Quiles L., Fito M., Martí A., Toledo E. Egg consumption and cardiovascular disease according to diabetic status: The PREDIMED study. *Clinical Nutrition*, 2017, 36(4): 1015-1021 (doi: 10.1016/j.clnu.2016.06.009).
  70. Kim J.E., Ferruzzi M.G., Campbell W.W. Egg consumption increases vitamin E absorption from co-consumed raw mixed vegetables in healthy young men. *The Journal of Nutrition*, 2016, 146(11): 2199-2205 (doi: 10.3945/jn.116.236307).
  71. Kim J.E., Gordon S.L., Ferruzzi M.G., Campbell W.W. Effects of egg consumption on carotenoid absorption from co-consumed, raw vegetables. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2015, 102(1): 75-83 (doi: 10.3945/ajcn.115.111062).
  72. Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A., Risnik D.V., Nikityuk D.B., Tutel'yan V.A. *Voprosy pitaniya*, 2017, 86(4): 113-124 (in Russ.).
  73. Tripkovic L., Wilson L.R., Hart K., Johnsen S., de Lusignan S., Smith C.P., Hypponen E. Daily supplementation with 15 µg vitamin D<sub>2</sub> compared with vitamin D<sub>3</sub> to increase wintertime 25-hydroxyvitamin D status in healthy South Asian and white European women: a 12-wk randomized, placebo-controlled food-fortification trial. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2017, 106(2): 481-490 (doi: 10.3945/ajcn.116.138693).