УДК 612.386:547.979.1
DOI: 10.34215/1609-1175-2026-3-14-17

CC BY 4.0

Хлорофилл в желудочно-кишечном тракте

В.М. Колдаев[1], А.Е. Коцюба[2], В.М. Черток[2]

[1] *Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*
[2] *Тихоокеанский государственный медицинский университет, Владивосток, Россия*

Целью обзора является анализ публикаций о трансформации, всасывании и биодоступности хлорофиллов при переваривании в желудочно-кишечном тракте. Методом реализации цели служил патентный поиск в библиографических базах данных Web of Science, Scopus, Google Scholar, e-Library. Результаты анализа показывают, что хлорофиллы проходят оральный отдел без существенных изменений, в кислой среде желудка из молекулы хлорофилла удаляется центральный тетрапиррольный атом магния, и хлорофилл превращается в феофитин, который в щелочной среде тонкой кишки дефитилируется до феофорбида. Хлорофилл-a превращается в феофорбид, в 2,5–9 раз эффективнее по сравнению с хлорофиллом-b. Энтероциты всасывают в основном водные мицеллярные фракции деградированных хлорофиллов. Продукты превращения хлорофиллов снижают активность амилазы и панкреатической липазы, подавляют переваривание полисахаридов и липидов. Будущие исследования должны быть направленными на изучение роли хлорофиллов в переваривании различных сопутствующих компонентов пищевого комка.

Ключевые слова: *антиоксидант, феофитин, феофорбид, всасывание, биодоступность*

Поступила в редакцию: 18.01.2026. Получена после доработки: 17.03.2026. Принята к публикации: 03.04.2026

Для цитирования: Колдаев В.М., Коцюба А.Е., Черток В.М. Хлорофилл в желудочно-кишечном тракте. *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2026;3:14–17. doi: 10.34215/1609-1175-2026-3-14-17

Для корреспонденции: Колдаев Владимир Михайлович – д.б.н., профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории лекарственных растений ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения Российской академии наук (690022, г. Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159); ORCID: 0000-0002-6206-200X; e-mail: kolvm42@rambler.ru

Chlorophyll in the gastrointestinal tract

V.M. Koldaev[1], A.E. Kotsyuba[2], V.M. Chertok[2]

[1] *Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*
[2] *Pacific State Medical University, Vladivostok, Russia*

This review aims to analyze the literature on the transformation, absorption, and bioavailability of chlorophylls during digestion in the gastrointestinal tract. A patent search was conducted in Web of Science, Scopus, Google Scholar, and e-Library databases. Analysis results reveal that chlorophylls pass through the oral tract without significant changes; however, in the acidic environment of the stomach, the central tetrapyrrole magnesium atom is removed from the chlorophyll molecule, and the chlorophyll is converted to pheophytin, which is defytilated to pheophorbide in the alkaline environment of the small intestine. Chlorophyll-a is converted to pheophorbide, which is 2.5 –9 times more efficiently than chlorophyll-b. Enterocytes primarily absorb the aqueous micellar fractions of degraded chlorophylls. Chlorophyll breakdown products reduce amylase and pancreatic lipase activity, thereby inhibiting the digestion of polysaccharides and lipids. Conclusively, future research should focus on investigating the role of chlorophylls in digesting various components that accompany the bolus.

Keywords: *antioxidant, pheophytin, pheophorbide, absorption, bioavailability*

Received 18 January 2026; Revised 17 March 2026; Accepted 3 April 2026

For citation: Koldaev V.M., Kotsyuba A.E., Chertok V.M. Chlorophyll in the gastrointestinal tract. *Pacific Medical Journal.* 2026;3:14–17. doi: 10.34215/1609-1175-2026-3-14-17

Corresponding author: Vladimir M. Koldaev, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Leading Researcher, Laboratory of Medicinal plants, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (159 Avenue of 100-years Vladivostok, Vladivostok, 690022, Russia); ORCID: 0000-0002-6206-200X; e-mail: kolvm42@rambler.ru

Хлорофиллы – циклические тетрапирролы с центральным атомом магния и полиизопреновым «хвостом» фитолом – наиболее распространенные зеленые пигменты, обеспечивающие фотосинтез, ежегодное их производство фотосинтезирующими организмами достигает 1,2 млрд тонн [1]. В высших растениях хлорофиллы (Хл) присутствуют в двух структурно близких модификациях: хлорофилл-a и хлорофилл-b [2], отличающихся лишь радикалами во втором пирроле (рис. 1).

В организме человека Хл, проявляя свою антиоксидантную активность (АОА) [3], уменьшают риски хронических [4] и острых [5] заболеваний. В составе зеленых овощей (табл.) Хл потребляются с пищей ежедневно до 50 мг на душу населения [6].

© *Колдаев В.М., Коцюба А.Е., Черток В.М., 2026*

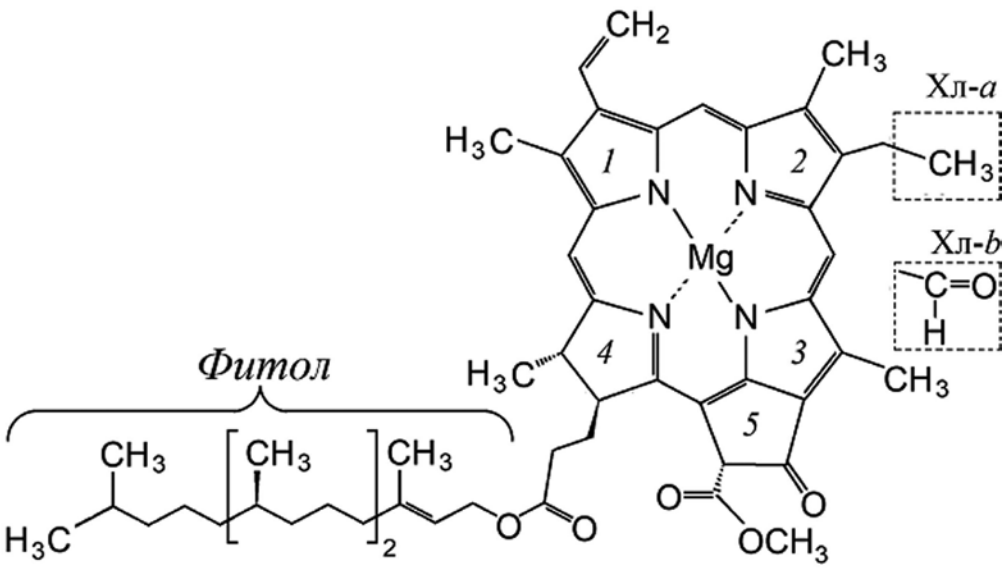


Рис. 1. Структура хлорофиллов. Во втором пирроле в штриховых квадратах для Хл-a – метильная, для Хл-b – формильная группы.

Несмотря на полезность для здоровья и непременное присутствие в пище пищеварение Хл изучено недостаточно полно.

Результаты исследований превращений Хл в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) представлены отрывочно в разнообразных публикациях, просмотр которых требует специальных подборок, что и послужило поводом написания статьи.

Цель обзора – анализ публикаций о трансформациях, всасывании и биодоступности Хл в ЖКТ. Для достижения цели произведен поиск в библиографических базах данных Web of Science, Scopus, Google Scholar, e-Library. Следует заметить, что Хл довольно неустойчивы вне биологического пула и редко вовлекаются в экспериментальную практику. Вместо них часто используют так называемые хлорины, получаемые искусственной заменой центрального Mg на Cu, что значительно повышает их устойчивость [7]. Пищеварение хлоринов не рассматривается в настоящем обзоре, поэтому из отобранных 94 источников для анализа взято всего лишь 18 наиболее валидных публикаций по заявленной тематике.

Большинство опубликованных исследований с Хл выполнено *in vitro* на трехфазных моделях пищеварения: полость рта («оральная») → желудок («желудочная») → кишечник («кишечная»), имитирующих условия прохождения пищи в ЖКТ [7]. Первые исследования *in vitro* с использованием шпината [6] показали, что в «оральной» фазе каких-либо заметных изменений молекул Хл не происходит; в «желудочной» – переваривание в течение одного часа при pH 2 сопровождается заменой центрального Mg на два протона *H* с образованием феофитина (рис. 2, а) до 100% из потребленного Хл. Поскольку желудочный pH здоровых людей натощак составляет примерно 2–2,5, авторы считают, что феофитин производные Хл, обнаруживаемые в фекалиях, преимущественно образуются в «желудочной» фазе.

Аналогичные исследования *in vitro* на моделях последовательного переваривания свежего и термически обработанного пюре из шпината показали [8], что образовавшиеся в «желудочной» фазе феофитины далее в щелочной среде «кишечной» фазы при pH

Таблица

Содержание хлорофилла в зеленых овощных растениях [6]

Наименование	Хлорофилл, мг/100 г		Наименование	Хлорофилл, мг/100 г	
	a	b		a	b
Шпинат	24–94	14,7–29	Зеленый перец	4,1–5,8	2,8–3,8
Петрушка	47,8	15,4	Зеленый горошек	3,9–7,3	1,2–2,8
Салат латук	18,5–19,9	4,6–10,4	Артишок	3,7–5,3	1,2–10,5
Лук порей	6,63–16,7	2,07–10,3	Огурец с кожурой	2,57	1,02
Фасоль	5,8–24,4	1,67–13	Брюссельская капуста	2,3–5,0	0,9–2,8
Цуккини	4,91	6,8	Сельдерей	1,78	0,52
Китайская капуста	4,1–11,5	1,6–4,7	Брокколи	1,6–12,0	0,5–0,3

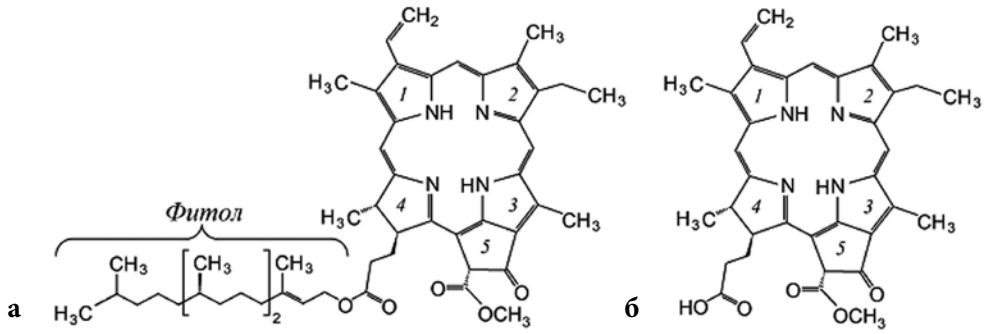


Рис. 2. Структура продуктов трансформации хлорофилла-а: а – феофитин-*а*, б – феофорбид-а.

около 8 трансформируются в феофорбиды (рис. 2, б) с отщеплением фитола.

K. Chen и M. Roca [9] с целью изучения зависимости переваривания Хл от структуры тетрапиррольного кольца в опытах *in vitro* использовали три вида съедобных водорослей: нори (*Porphyra umbilicalis*), морской салат (*Ulva spinulosa*) и комбу (*Laminaria ochroleuca*) с преимущественным содержанием Хл-а, Хл-а с Хл-b и Хл-а с Хл-с соответственно. Судя по результатам исследований, превращение Хл-а в феофитин-а происходит быстрее в 2,5 и 9 раза по сравнению Хл-b и Хл-с. Авторы предполагают, что вопреки энергетической выгодности обмена атома Mg на два протона Н в молекуле Хл согласно теоретическим представлениям, реакционная способность Хл зависит еще не только от структуры макроцикла, но и от состава периферических групп. К примеру, Хл-а и Хл-b при одинаковой структуре макроцикла имеют разные радикалы во втором пирроле (рис. 1), при этом формильная группа проявляет электроноакцепторные свойства, что снижает восприимчивость атомов азота N в макроцикле к электрофильной атаке в Хл-b по сравнению с метильной группой, поэтому Хл-b и (а также и Хл-с) в меньшей степени подвержен деградации и соответственно более стабилен в пищеварительной среде.

В опытах по перевариванию шпината на «молодых» (3-недельных) и «взрослых» (8-недельных) мышах [10] выявлено, что кишечные бактерии *Blautia* и неклассифицированные *Lachnospiraceae* способствуют превращению феофитинов в феофорбиды. Таким образом, наряду с кислотно-щелочными условиями пищеварительной среды и кишечная микробиота вносит существенный вклад в трансформацию Хл.

Поскольку Хл с продуктами деградации в воде нерастворимы, то, безусловно, возникла немаловажная проблема всасывания, и в прошлом даже ставилась под сомнение усвояемость зеленых пигментов организмом человека. Затем было обнаружено, что феофитины и феофорбиды образуют гидрофильные мицеллы, которые поглощаются до 5–10% от изначального количества производных Хл, например [8] культуральными кишечными клетками Caco-2. Аналогичные данные получены [11] и в опытах с экстрактами сладкого перца на *in vitro* модели, воспроизводящей «желудочную» и «кишечную» фазы пищеварения, а также в экспериментах по пищеварению и всасыванию продуктов распада Хл-а мидиями *Mytilus edulis* L., потребляющими водоросли *Phaeodactylum tricornutum Bohlin* [12] и веслоногими рачками копеподами *Calanus pacificus*, питающимися зелеными микроводорослями [13]. Предварительная термическая обработка хлорофилл-содержащих водорослей нори (преимущественно Хл-а), морского салата (Хл-а и Хл-b) и комбу (Хл-с), как показано на пищеварительной модели *in vitro* [14], практически не влияла на образование мицелл производными Хл-b и Хл-с и снижала производными Хл-а. Интересно отметить, что всасываемость, биодоступность Хл из водорослей, приготовленных в микроволновой печи, всегда выше, чем приготовленных на обычной плите. Выявлено [15], что в процессах образования мицелл и последующего их всасывания клетками Caco-2 предпочтение отдается дефитилированным производным Хл по сравнению с фитилированными, при этом мицеллированные феофорбиды оказываются наиболее усваиваемыми. Таким образом, продукты деградации Хл образуют водные мицеллы, которые всасываются энтероцитами тонкой кишки и затем с током крови доставляются к органам-мишеням.

Поскольку Хл проявляют антирадикальные и антиоксидантные свойства [2], то, вероятно, могут вовлекаться в химические пищеварительные процессы. Вопросы взаимодействия Хл и сопутствующих компонентов пищи в условиях ЖКТ только начинают изучаться. Например, X. Wang и соавт. [16] показали, что Хл-а и его феофитин-а значительно снижают гидролиз крахмала, абсорбируясь на гранулах и тем самым препятствуя контактам с ферментами, и снижением активностей α-амилазы и α-глюкозидазы, блокируя своими порфириновым кольцом аминокислотные остатки последних. Получено также [17], что в условиях, имитирующих среду ЖКТ человека, феофитины снижают активность липаз поджелудочной железы. Попытки исследования зависимости пищеварения от содержания Хл в коммерческих продуктах питания – гуакамоле, оливковом масле, пельменях, хумусе, шоколаде, соках авокадо и киви, соусе песто, выбранных в связи с составом жиров, клетчатки, белков и углеводов, оказались не совсем удачными из-за невысокой валидности полученных экспериментальных данных.

Но обнаружена корреляция показателей деградации Хл с содержанием поваренной соли в пище [18].

В заключение, исходя из существа рассмотренного материала, следует отметить следующее.

1. В процессе пищеварения наиболее существенные превращения Хл происходят в кислой среде «желудочной» фазы: при замене центрального атома металла на два протона образуются феофитины, в щелочной среде «кишечной» фазы с отщеплением фитола возникают феофорбиды, образованию которых способствует и кишечная микробиота. Хл-a более склонны к феофитинизации по сравнению с Хл-b и Хл-c.

2. Гидрофильная мицеллизация продуктов деградации Хл является ключевым звеном, обеспечивающим их поглощение эпителиальными клетками кишечника и дальнейшего продвижения к внутренним органам-мишеням, где, собственно, и проявляются лечебные эффекты зеленых пигментов.

3. В будущем целесообразно исследовать зависимости содержания Хл на эффективность пищеварения сопутствующих компонентов пищевого комка.

Конфликт интересов: *авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Источник финансирования: *работа выполнена согласно государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 124012200183-8).*

Литература / References

1. Yang Z, Li F, Shen S, Wang X, Ibrahim AN, Zheng H. Natural chlorophyll: a review of analysis methods, health benefits, and stabilization strategies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* 2025;65(16):3069–3083. doi: 10.1080/10408398.2024.2356259
2. Pareek S, Sagar NA, Sharma S, Kumar V, Agarwal T, González-Aguilar GA, Yahia EM. Chlorophylls: Chemistry and biological functions. *Fruit and vegetable phytochemicals: Chemistry and Human Health.* 2017;1(1):269–284. doi: 10.1002/9781119158042.ch14
3. Pérez-Gálvez AF, Viera I, Rosa M. Carotenoids and chlorophylls as antioxidants. *Antioxidants.* 2020;9(6):505–543. doi: 10.3390/antiox9060505
4. Колдаев В.М., Кропотов А.В.. Хлорофилл и его дериваты в практической медицине. *Тихоокеанский медицинский журнал.* 2025;(2):18–23. [Koldaev VM, Kropotov AV. Chlorophyll and its derivatives in practical medicine. *Pacific Medical Journal.* 2025;(2):18–23. (In Russ.)]. doi: 10.34215/1609-1175-2025-2-18-23
5. Колдаев В.М. Лечебно-профилактические эффекты хлорофиллов при наиболее угрожающих патологических состояниях. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.*2025;(5):25–29. [Koldaev VM. Therapeutic and preventive effects of chlorophylls in the most threatening pathological conditions. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2025;(5):25–29. (In Russ.)]. doi: 10.17513/mjpfi.13725
6. Zhong S, Bird A, Kopec RE. The metabolism and potential bioactivity of chlorophyll and metallo-chlorophyll derivatives in the gastrointestinal tract. *Molecular Nutrition Food Research*. 2021;65(7):2021;65(7):1–11. doi: 10.1002/mnfr.202000761
7. Martins T, Barros AN, Rosa E, Antunes L. Enhancing health benefits through chlorophylls and chlorophyll-rich agro-food: A comprehensive review. *Molecules.* 2023;28(14):5344–5376. doi: 10.3390/molecules28145344
8. Ferruzzi MG, Failla ML, Schwartz SJ. Assessment of degradation and intestinal cell uptake of carotenoids and chlorophyll derivatives from spinach puree using an in vitro digestion and Caco-2 human cell model. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001;49(4):42082–42089. doi: 10.1021/jf000775r
9. Chen K, Roca M. In vitro digestion of chlorophyll pigments from edible seaweeds. *Journal of Functional Foods.* 2018;40:400–407. doi: 10.1016/j.jff.2017.11.030
10. Li Y, Lu F, Wang X, Hu X, Liao X, Zhang Y. Biological transformation of chlorophyll-rich spinach *(Spinacia oleracea L.)* extracts under *in vitro* gastrointestinal digestion and colonic fermentation. *Food Research International.* 2021;139:109941. doi: 10.1016/j.foodres.2020.109941
11. Roca M. In vitro digestive stability and uptake by Caco-2 human intestinal cells of nonfluorescent chlorophyll catabolites. Food Chemistry. 2012;130(1):1134–1138. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.07.016
12. Hawkins AJS, Bayne BL, Mantoura RFC, Llewellyn CA, Navarro E. Chlorophyll degradation and absorption throughout the digestive system of the blue mussel *Mytilus edulis L. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology.* 1986;96(3):213–223. doi: 10.1016/0022-0981(86)90204-2
13. Penry DL, Frost BW. Chlorophyll a degradation by Calanus pacificus: Dependence on ingestion rate and digestive acclimation to food resources. *Limnology and Oceanography.* 1991;36(1):147–158. doi: 10.4319/lo.1991.36.1.0147
14. Chen K, Roca M. Cooking effects on bioaccessibility of chlorophyll pigments of the main edible seaweeds. *Food Chemistry.* 2019;295:101–109. doi: 10.5851/kosfa.2023.e80
15. Chen K, Roca M. In vitro bioavailability of chlorophyll pigments from edible seaweeds. *Journal of functional Foods.* 2018;41:25–33. doi: 10.1016/j.jff.2017.12.029
16. Wang X, Yang Z, Shen S, Ji X, Chen F, Liao X, Zhang H, Zhang Y. Inhibitory effects of chlorophylls and its derivative on starch digestion *in vitro. Food Chemistry.* 2023;413:13377. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.135377
17. Wang X, Li Y, Shen S, Yang Z, Zhang H, Zhang Y. Chlorophyll inhibits the digestion of soybean oil in simulated human gastrointestinal system. *Nutrients.* 2022;14(9):1749. doi: 10.3390/nu14091749
18. Viera I, Herrera M, Roca M. Influence of food composition on chlorophyll bioaccessibility. *Food Chemistry.* 2022;386:132805. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.132805