

УДК 663.18

ПОЛУЧЕНИЕ ФИТОАНТИОКСИДАНТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ИЗ БИОМАССЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВИДОВ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И ПЕРСПЕКТИВА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

© Ю.Г. Базарнова, А.А. Балабаев*, О.Р. Левчук

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Высшая школа биотехнологий и пищевых производств,
ул. Новороссийская, 48. Санкт-Петербург, 194021, Россия,
balabaev-alexey97@mail.ru

Статья посвящена вопросам получения ценных нутрицевтиков из биомассы микроводорослей. Выделены фитоантиоксидантные комплексы с высоким содержанием каротиноидов, хлорофиллов и фенольных соединений из биомассы микроводорослей *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina* и *Nannochloris sp.* Приведены методики культивирования биомассы микроводорослей, экстракции фитоантиоксидантных комплексов каротиноидов, хлорофиллов и фенольных соединений.

Проанализирован фитохимический состав полученных фитоантиоксидантных комплексов, приведены результаты *in silico* прогнозирования биологической активности идентифицированных биомолекул и экспериментально полученные значения антиоксидантной активности с помощью метода DPPH. Содержание каротиноидов в выделенных [ФАО]_{кар} варьируется от 24 до 78 мкг/г. Содержание хлорофиллов в выделенных [ФАО]_{хл} – 615–1420 мкг/г. Содержание фенольных соединений в полученных [ФАО]_{фс} – 997–1405 мкг/г.

[ФАО]_{кар}, выделенный из *D. Salina*, может быть использован в качестве функциональной пищевой добавки, обладающей умеренно высокой антиоксидантной активностью или в составе косметических SPF-средств и фармацевтических субстанций в качестве источника каротиноидов и провитамина А, которые усиливают защитные свойства кожи по отношению к УФ-излучению. [ФАО]_{хл}, выделенный из *Nannochloris sp.*, может быть рекомендован к использованию в качестве пищевого красителя для безалкогольных напитков и сладкоконсервированной продукции, а также в качестве компонента в составе кремов, мазей, сывороток, предназначенных для ускорения пролиферации и эпителизации клеток кожи. [ФАО]_{фс}, выделенный из *Ch. vulgaris*, рекомендован к использованию в качестве водорастворимой функциональной пищевой добавки с высокой антиоксидантной активностью, а также фармсубстанции для производства препаратов, обладающих противоопухолевыми, противовоспалительными и кардиозащитными свойствами.

Ключевые слова: валоризация биомассы фототрофных микроводорослей, фитоантиоксидантные комплексы, каротиноиды, хлорофиллы, фенольные соединения, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Nannochloris*.

Для цитирования: Базарнова Ю.Г., Балабаев А.А., Левчук О.Р. Получение фитоантиоксидантных комплексов из биомассы промышленных видов микроводорослей и перспектива их применения // Химия растительного сырья. 2025. №4. С. 317–326. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250415966>.

Введение

Процесс накопления свободных радикалов в организме человека под воздействием экологических и антропогенных факторов окружающей среды повышает риск возникновения диабета, инфаркта миокарда и различных форм онкологии. Здоровая клетка обладает собственным защитным механизмом связывания свободных радикалов. Однако имеющихся ресурсов не всегда достаточно, поэтому антиоксиданты должны поступать в организм человека и животных в составе пищи [1].

Наиболее известные синтетические и природные антиоксиданты – ионол, фанозоны, оксипиридин и мексидол, витамин Е, β-каротин, ликопин. Среди структурных аналогов природных антиоксидантов можно выделить тролокс – водорастворимый аналог витамина Е, что природные биологически активные субстанции усваиваются организмом более эффективно, поскольку содержатся в растительных источниках в сбалансированном соотношении. Таким образом, поиск природных источников антиоксидантов остается актуальным [2].

* Автор, с которым следует вести переписку.

Основными источниками природных антиоксидантов являются высшие растения [3], а также фототрофные микроводоросли, фитохимические вещества которых включают хлорофиллы, каротиноиды и фенольные соединения, относящиеся к растительным метаболитам [4–6]. По темпам валоризации и коммерциализации микроводорослей для получения ценных метаболитов лидируют Китай, Индия и Южная Корея [7], которые производят нутрицевтики в виде суспензий, масел и твердых лекарственных форм каротиноидов, фикоцианинов, хлорофиллов, фенольных соединений и различных углеводов [8, 9].

В настоящее время хлорофилл зарегистрирован как пищевая добавка E140, а его производные – медь-содержащие комплексы хлорофиллов (E141) используются в составе мазей и кремов с целью ускорения пролиферации и эпителизации клеток кожи [7, 10, 11]. Каротиноиды – жирорастворимые нутрицевтики с выраженными антирадикальными свойствами, обусловленными разветвленной химической структурой с большим количеством сопряженных кратных связей [12, 13]. Результаты исследований автора J.M. Landete свидетельствуют, что каротиноиды значительно усиливают антиоксидантную способность микроводорослей [14]. В космецевтике и фармацевтическом производстве β -каротин является важным компонентом рецептурных композиций БАДов и средств по уходу за кожей, волосами, SPF-средств, зубной пасты, а также декоративной косметики. β -каротин усиливает защитные свойства кожи по отношению к УФ-излучению и уменьшает риск проявления пигментации [15]. Фенольные кислоты (С6-С1), гидроксикоричные кислоты (С6-С3), флавоноиды (С6-С3-С6) растений являются эссенциальными микронутрицевтиками [16], многие из них обладают высокой антиоксидантной активностью, превосходящей активность «типичных» антиоксидантов, в том числе токоферола [17]. Вышеперечисленные вещества обладают широким спектром физиологической активности, проявляя противоопухолевые, противовоспалительные, кардиозащитные, капилляроукрепляющие и антимикробные свойства [18].

Зарубежные исследователи имеют обширный опыт применения различных видов микроводорослей. Т. Marina et al. получали фитоантиоксидантные комплексы из микроводоросли *Haematococcus pluvialis* с целью производства средств для увлажнения и защиты кожных покровов [19]. М. Barkallah и Р. Fradinho изучали фитоантиоксидантные комплексы *Spirulina* sp. в качестве функциональной добавки для йогуртов и для повышения пищевых качеств макаронных изделий [20, 21]. Е.В. Трухиной и др. использовалась биомасса *Chlorella sorokiniana* в качестве пищевой добавки для макаронных изделий [22].

Среди широкого разнообразия промышленных видов микроводорослей наиболее популярным является род *Chlorella*, который обитает в пресноводных водоемах северных и южных широт и не требователен к условиям окружающей среды, применяется в целях очистки сточных вод и получения кормовой биомассы [23]. Среди морских видов микроводорослей наиболее изученным является род *Dunaliella*, который известен как один из наиболее перспективных природных источников β -каротина [24, 25]. Из перспективных, но малоизученных видов стоит отметить *Nannochloris*, обитающий в пресноводных и щелочных водоемах на территории средних широт и применяющийся в качестве кормовой добавки для сельскохозяйственных животных [26]. Все перечисленные микроводоросли используются для создания возобновляемого топливного сырья, удобрений, очистки сточных вод и утилизации промышленных газов [27].

Цель настоящей работы – получение фитоантиоксидантных комплексов из биомассы микроводорослей *Chlorella*, *Dunaliella* и *Nannochloris*, изучение их состава и *in silico* прогнозирование спектра биологической активности.

Экспериментальная часть

Получение биомассы микроводорослей. Для культивирования использовали штаммы *Chlorella vulgaris* BIN «ООО Альготек» (Тверь), *Nannochloris* sp. Naumann штамм IPPAS C-1509 из коллекции Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, *Dunaliella salina* (Dunal) Teod IPPASD-294 из коллекции культур микроводорослей Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН (ИФР-РАН (IPPAS)) (Москва).

Получение биомассы *Chlorella vulgaris* BIN, *Nannochloris* sp. и *Dunaliella salina* осуществляли в лабораторных условиях по разработанной нами методике [28]. В качестве культуральной среды использовали среды Тамия, Заррука [23] и искусственную морскую воду (ASW) [29]. Биомассу, полученную в процессе культивирования микроводорослей, лиофилизировали (-50 °С; 0.5 бар; 48 ч).

Экстракция. Каротиноиды и хлорофиллы. Образец лиофилизата массой 0.100 ± 0.001 г смешивали с экстрагирующей смесью (96% этиловый спирт и *n*-гексан 2 : 1) в соотношении 1 : 30 по массе. Активацию биомассы осуществляли с помощью ультразвукового гомогенизатора Scientz-IID в течение 5 мин (20 кГц; 125 Вт),

после чего экстрагировали хлорофиллы и каротиноиды в течение 20 мин при температуре 22 ± 2 °C без перемешивания. Полученную смесь охлаждали до температуры 6 ± 2 °C и отделяли экстракт от шрота путем центрифугирования (6000 об./мин). К супернатанту добавляли 0.75 мл 20% раствора КОН и перемешивали до полного омыления примесей, после чего отделяли хлорофиллы от каротиноидов на делительной воронке.

Фенольные соединения. Для извлечения фенольных соединений образец лиофилизата массой 0.100 ± 0.001 г смешивали с 10 г 50% этилового спирта и осуществляли УЗ-экстракцию с использованием гомогенизатора Scientz-III в течение 15 мин (20 кГц; 125 Вт) при температуре 22 ± 2 °C. Полученный экстракт отделяли от шрота путем центрифугирования (6000 об./мин).

Анализ состава экстрактов. Экстракт хлорофиллов разводили в 96% этиловом спирте в соотношении 1 : 4. Экстракт каротиноидов упаривали (28 °C; 2 кПа; 60 об./мин) на роторном испарителе LabTechEv311Vac, полученные кристаллы перерастворяли в 10 мл 96% этилового спирта. Подготовленные образцы экстрактов фотометрировали на приборе Shimadzu UV-1280 в спектральном диапазоне 400–750 нм с шагом 1 нм. Содержание хлорофиллов и каротиноидов оценивали с использованием модифицированной методики [28].

Содержание суммы фенольных веществ в экстракте определяли по Фолину-Чокалтеу [30]. Реакционную смесь инкубировали при комнатной температуре в течение 30 мин и фотометрировали при длине волны 765 нм. Содержание фенольных соединений рассчитывали по уравнению стандартной кривой, полученной по галловой кислоте.

Для определения содержания флавоноидов экстракт фенольных соединений последовательно промывали двумя объемами петролейного эфира для отделения от неполярных пигментов на делительной воронке, отделяя спиртовую фазу от петролейной. Далее осуществляли гидролиз гликолей путем внесения 10 мл смеси этилацетата и этанола (9 : 1). Полученную смесь сгущали на роторном испарителе в условиях (70 °C, 2 кПа, 60 об./мин) до получения водно-спиртового азеотропа, после чего объем остатка доводили до 10 мл 50% этиловым спиртом и определяли содержание флавоноидов по методу Чанга [31]. Содержание флавоноидов рассчитывали по уравнению стандартной кривой, полученной по кверцетину.

Анализ компонентного состава экстрактов осуществляли методом тонкослойной хроматографии. В качестве неподвижной фазы использовали хроматографические пластины Sorbfil 100×100 мм. Для разделения каротиноидов использовали смесь диэтиловый эфир/петролейный эфир (3 : 1) [32, 33]. Для разделения хлорофиллов – смесь петролейный эфир-ацетон (95 : 5) [30]. Для разделения фенольных соединений – смесь *n*-бутанол/уксусная кислота/вода (4 : 1 : 5) [34, 35]. Длина хроматографического пути составляла 8 см. Идентификацию фитохимических веществ осуществляли с использованием денситометра Sorbfil по специфической флуоресценции в УФ-свете (длина волны 365 нм) [32–34, 36].

Прогнозная оценка антиоксидантных свойств биомолекул. Прогнозирование антиоксидантных свойств идентифицированных фитохимических веществ проводили с применением нескольких веб-сервисов, представленных на онлайн-платформах Way2Drug (Pass Online, AntiBacPred, AntiFunPred) [37].

Для анализа антиоксидантной активности (АОА) полученных фитоантиоксидантных комплексов хлорофиллов, каротиноидов и фенольных соединений использовали метод DPPH в модификации [38].

Обсуждение результатов

В таблице 1 приведены характеристики фитоантиоксидантных комплексов (далее по тексту – [FAO]) *Ch. vulgaris*, *D. Salina* и *Nannochlorissp.*

Хроматографическая картина распределения компонентов [FAO] приведена на рисунке 1. В таблице 2 приведены коэффициенты подвижности (R_f) идентифицированных фитохимических веществ в составе [FAO].

Установлено, что [FAO]_{кар} *Ch. v.* отличается более разнообразным составом каротиноидов относительно *D. sal.* и *N. sp.* (рис. 1). В [FAO]_{кар} *Ch. v.* идентифицирован астаксантин, что хорошо согласуется с литературными данными [39]. Наибольшим разнообразием фенольных соединений обладает [FAO]_{фс}, выделенный из *D. sal.*, в котором четко идентифицированы *n*-кумаровая и *n*-оксибензойная кислота и идентифицированы производные кверцетина. [FAO]_{фс} комплексы *Ch. v.* и *N. sp.* имеют схожий состав, что связано с близкой видовой принадлежностью этих микроводорослей. Качественный состав [FAO]_{хл} *D. sal.*, *Ch. v.* и *N. sp.* существенно не отличаются (табл. 2), основными идентифицированными веществами [FAO]_{хл} являются хлорофилл *a* и хлорофилл *b* [40].

Таблица 1. Характеристики выделенных [ФАО] *Ch. vulgaris*, *D. salina* и *Nannochloris sp.*

Показатель	[ФАО] _{кар} *		
	<i>Ch. vulgaris</i>	<i>D. salina</i>	<i>Nannochloris sp.</i>
Содержание каротиноидов, мкг/г	24.3±1.8	77.9±6.2	37±2.9
от рекомендуемой суточной нормы потребления, %	1.2	3.9	1.9
Органолептические свойства	Жидкость желтого цвета, без запаха		
Плотность, г/мл	0.66		
Растворим при температуре 22±2 °C	Нерастворим		
в воде	Ацетон, гексан, этанол		
в органических растворителях	420–470		
Спектральные характеристики, нм			
Показатель	[ФАО] _{хл}		
	<i>Ch. vulgaris</i>	<i>D. salina</i>	<i>Nannochloris sp.</i>
Содержание хлорофиллов, мкг/г	615±47	783±62	1420±128
от рекомендуемой суточной нормы потребления, %	0.6	0.8	1.4
Органолептические свойства	Жидкость темно-зеленого цвета, без запаха		
Плотность, г/мл	0.78		
Растворим при температуре 22±2 °C	Растворим		
в воде	Водно-спиртовые смеси, ацетон		
в органических растворителях	640–670		
Спектральные характеристики, нм			
Показатель	[ФАО] _{фс}		
	<i>Ch. vulgaris</i>	<i>D. salina</i>	<i>Nannochloris sp.</i>
Содержание, мкг/г:			
фенольные соединения	1405±105	997±84	1130±76
флавоноиды	158±12	122±9	134±11
от рекомендуемой суточной нормы потребления, %	0.7	0.5	0.6
Органолептические свойства	Жидкость светло-желтого цвета, без запаха		
Плотность, г/мл	0.92		
Растворим при температуре 22±2 °C	Растворим		
в воде	Водно-спиртовые смеси, ацетон		
в органических растворителях	220–380		
Спектральные характеристики, нм			

[ФАО]_{кар} – фитоантиоксидантный комплекс каротиноидов; [ФАО]_{хл} – фитоантиоксидантный комплекс хлорофиллов; [ФАО]_{фс} – фитоантиоксидантный комплекс фенольных соединений.

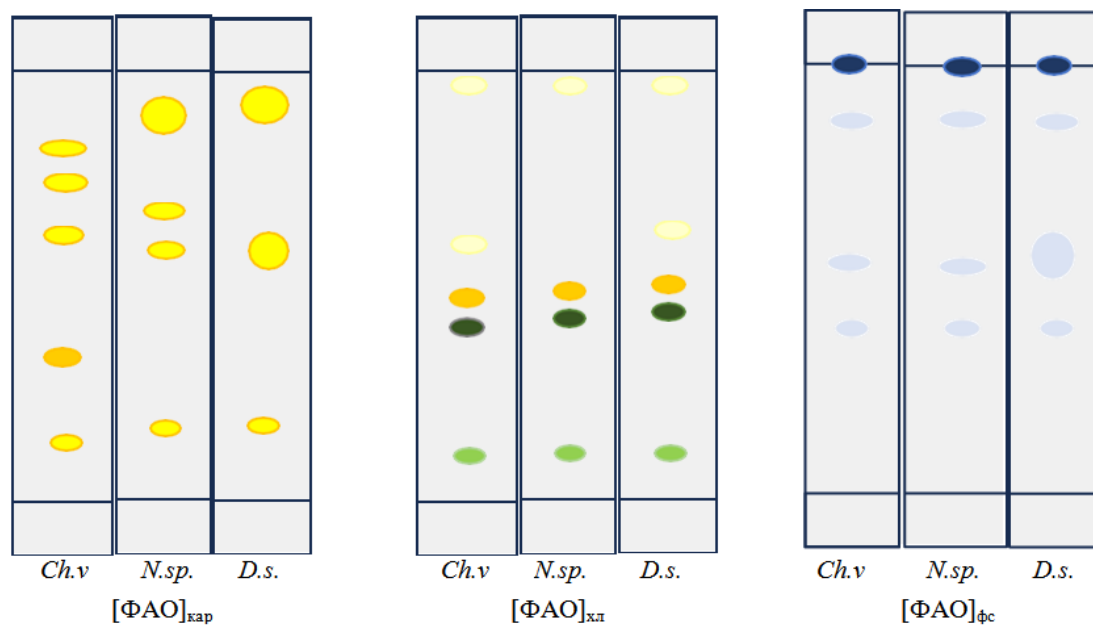


Рис. 1. Результаты ТСХ [ФАО]

Таблица 2. Коэффициенты подвижности идентифицированных в [ФАО] фитохимических веществ

Полученные значения Rf	Литературные значения Rf	[ФАО] _{кар}	[ФАО] _{хл}	[ФАО] _{фс}
0.16	0.16 [36]	лютеин астаксантин	Хлорофилл b	<i>n</i> -кумаровая к-та <i>n</i> -оксибензойная к-та
0.12	0.125 [32]		Хлорофилл а β-каротин	
0.37–0.39	0.367 [32]			
0.42	0.42 [36]			
0.49–0.51	0.49 [36]	кантаксантин β-каротин		 кверцетин
0.70	0.703 [32]			
0.80–0.82	0.82 [32]			
0.86–0.88	0.88 [35]			

Согласно данным таблицы 1, [ФАО], выделенные из биомасс микроводорослей, являются перспективными объектами для дальнейших исследований с целью создания востребованных функциональных пищевых и косметических продуктов, которые могут быть использованы в качестве:

– [ФАО]_{кар} – функциональной пищевой добавки, обладающей умеренно высокой антиоксидантной активностью, или в составе косметических SPF-средств и фармацевтических субстанций в качестве источника каротиноидов и провитамина А, которые усиливают защитные свойства кожи по отношению к УФ-излучению;

– [ФАО]_{хл} – пищевого красителя для безалкогольных напитков и сладкоконсервированной продукции, а также в качестве компонента в составе кремов, мазей, сывороток, предназначенных для ускорения пролиферации и эпителизации клеток кожи;

– [ФАО]_{фс} – водорастворимой функциональной пищевой добавки с высокой антиоксидантной активностью, а также фармсубстанции для производства препаратов, обладающих противоопухолевыми, противовоспалительными и кардиозащитными свойствами.

Результаты *in silico* прогнозирования антиоксидантной активности идентифицированных в составе [ФАО] биомолекул приведены в таблице 3 и 4.

Прогнозная оценка АОА выявила, что наибольшая вероятность проявления ингибирующей способности по отношению к свободным радикалам ($P_a > 0.71$) характерна для молекул каротиноидов и флавоноидов.

В таблице 5 приведены результаты экспериментальных исследований ингибирующей способности антиоксидантов, содержащихся в [ФАО].

Таблица 3. Прогнозируемая антиоксидантная активность молекул каротиноидов, идентифицированных в [ФАО]

Каротиноиды	Лютеин	β-каротин	Астаксантин	Кантаксантин	Ваучераксантин
P_a^*	0.780	0.775	0.705	0.810	0.779
P_i^*	0.004	0.004	0.004	0.003	0.004

Таблица 4. Прогнозируемая антиоксидантная активность молекул фенольных соединений, идентифицированных в [ФАО]

Фенольные соединения	<i>n</i> -кумаровая кислота	<i>n</i> -оксибензойная кислота	Феруловая кислота	Кофейная кислота	Кверцетин	Катехин
P_a^*	0.553	0.405	0.541	0.603	0.810	0.820
P_i^*	0.005	0.012	0.005	0.007	0.003	0.003

* P_a – вероятность проявления активности ($P_a > 0.71$); P_i – вероятность проявления иннактивности.

Таблица 5. Значения АОА [ФАО], выделенных из биомассы микроводорослей *Ch. vulgaris*, *D. Salina* и *Nannochloris sp.*

[ФАО]	Процент ингибирования раствора DPPH ФАО комплексами, %		
	<i>Ch. vulgaris</i>	<i>D. salina</i>	<i>Nannochloris sp.</i>
Каротиноиды	12.2±0.4	13.6±0.5	14.8±0.7
Хлорофиллы	16.3±0.4	19.0±0.5	18.4±0.8
Фенольные соединения	15.6± 0.6	14.4±0.6	17.0±0.7

Выявлено, что все выделенные [ФАО] обладают умеренной антиоксидантной активностью. Полученные значения АОА данные хорошо согласуются с результатами исследований авторов Я.Л. Страх и др., которые изучали АОА водно-спиртовых вытяжек высших растений. Полученные ими значения АОА находились в пределах 19–38% ингибирования DPPH [41]. Авторами Т.В. Пилипенко и др. получены результаты исследований АОА масляных экстрактов высших растений, которая варьировалась в пределах 5–14% ингибирования DPPH [42].

Выводы

1. Из биомассы микроводорослей *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina*, *Nannochloris sp.* выделены фитоантиоксидантные комплексы, содержащие в качестве действующих веществ каротиноиды, хлорофиллы и фенольные соединения. Содержание каротиноидов в выделенных [ФАО]_{кар} варьируется от 24 до 78 мкг/г; содержание хлорофиллов – 615–1420 мкг/г; содержание фенольных соединений – 997–1405 мкг/г.

2. В результате изучения состава выделенных [ФАО] установлено, что наибольшим разнообразием каротиноидов обладает [ФАО]_{кар}, выделенный из *Ch. Vulgaris*, содержащий астаксантин. Разнообразием фенольных соединений отличается [ФАО]_{фс}, выделенный из *D. salina*, в котором идентифицированы *n*-кумаровая и *n*-оксибензойная кислоты. Выявлено, что качественный состав выделенных из биомассы *D. salina*, *Ch. vulgaris*. и *Nannochloris sp.* [ФАО]_{хл} существенно не отличаются.

3. В результате *in silico* прогнозирования спектра биологической активности идентифицированных в составе [ФАО] биомолекул, выявлено, что наибольшая вероятность проявления ингибирующей способности по отношению к свободным радикалам ($P_a > 0.71$) характерна для молекул каротиноидов и флавоноидов.

4. Получены значения антиоксидантной активности [ФАО], выделенных из биомассы *D. salina*, *Ch. vulgaris*. и *Nannochloris sp.*, которые хорошо согласуются с литературными данными и составляют от 12.5 до 19.5% ингибирования DPPH.

Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта «Цифровое моделирование и прогнозирование в медико-биологических системах» программы Научного центра мирового уровня ФГАОУ ВО «СПБПУ» (Соглашение от 20.04.2022 № 075-15-2022-311).

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Тринеева О.В. Методы определения антиоксидантной активности объектов растительного и синтетического происхождения в фармации (обзор) // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2017. №4. С. 180–197.
2. Яшин А.Я., Черноусова Н.И. Определение содержания природных антиоксидантов в пищевых продуктах и БАДах // Пищевая промышленность. 2007. №5. С. 28–30.
3. Pokorný J. Natural antioxidants for food use // Trends in Food Science & Technology. 1991. Vol. 2. Pp. 223–227. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(91\)90695-F](https://doi.org/10.1016/0924-2244(91)90695-F).
4. Gollakota K. ICT use by businesses in rural India: The case of EID Parry's Indiagriline // International Journal of Information Management. 2008. Vol. 28, no. 4. Pp. 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2008.04.003>.
5. Ahmadifar M., Esfahani, D.E., Ahmadifar E., Sheikhzadeh N., Mood S.M., Moradi S.Z. Combined Effects of and on the Growth Performance, Digestive Enzyme Activity, Antioxidative Status, and Immune Genes in Zebrafish // Annals of Animal Science. 2024. Vol. 23, no. 4. Pp. 1159–1167. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0019>.
6. Wu B., Cheng H., Li X., Yang Q., Hao S., Wang C., Sun B. Identification and functional analysis of phycocyanin-derived bioactive peptides with non-small cell lung cancer cell inhibition // Algal Research. 2024. Vol. 79. 103467. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103467>.
7. Banskota A.H. Sperker S., Stefanova R., McGinn P.J., O'Leary S.J. Antioxidant properties and lipid composition of selected microalgae // Journal of Applied Phycology. 2019. Vol. 31. Pp. 309–318. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1523-1>.
8. Li Y., Chen M. Novel chlorophylls and new directions in photosynthesis research // Functional Plant Biology. 2015. Vol. 42, no. 6. Pp. 493–501. <https://doi.org/10.1071/FP14350>.

9. Li H.B., Cheng K.W., Wong C.C., Fan K.W., Chen F., Jiang Y. Evaluation of antioxidant capacity and total phenolic content of different fractions of selected microalgae // *Food Chem.* 2007. Vol. 102, no. 3. Pp. 771–776. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.022>.
10. Mulders K.J., Lamers P.P., Martens D.E., Wijffels R.H. Phototrophic pigment production with microalgae: biological constraints and opportunities // *Journal of phycology.* 2014. Vol. 50, no. 2. Pp. 229–242. <https://doi.org/10.1111/jpy.12173>.
11. Viera I., Pérez-Gálvez A., Roca M. Green natural colorants // *Molecules.* 2019. Vol. 24, no. 1. 154. <https://doi.org/10.3390/molecules24010154>.
12. Hernández-Ledesma B., Herrero M. Bioactive Compounds from Marine Foods: Plant and Animal Sources. Madrid, 2013.
13. Goiris K., Muylaert K., Fraeye I., Foubert I., De Brabanter J., De Cooman L. Antioxidant potential of microalgae in relation to their phenolic and carotenoid content // *Journal of applied phycology.* 2012. Vol. 24. Pp. 1477–1486. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9804-6>.
14. Landete J.M. Dietary intake of natural antioxidants: vitamins and polyphenols // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* 2013. Vol. 53, no. 7. Pp. 706–721. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.555018>.
15. Safaar H., Van Wageningen J., Møller P., Jacobsen C. Carotenoids, phenolic compounds and tocopherols contribute to the antioxidative properties of some microalgae species grown on industrial wastewater // *Marine drugs.* 2015. Vol. 13, no. 12. Pp. 7339–7356. <https://doi.org/10.3390/md13127069>.
16. Manach C., Scalbert A., Morand C., Rémésy C., Jiménez, L. Polyphenols: food sources and bioavailability // *The American journal of clinical nutrition.* 2004. Vol. 79, no. 5. Pp. 727–747. <https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727>.
17. Cheynier V., Comte G., Davies K.M., Lattanzio V., Martens S. Plant phenolics: recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology // *Plant physiology and biochemistry.* 2013. Vol. 72. Pp. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.009>.
18. Shen N., Wang T., Gan Q., Liu S., Wang L., Jin B. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity // *Food Chemistry.* 2022. Vol. 383. 132531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>.
19. Marinao T., Iovinea A., Casellab P., Martinoc M., Chianese S., Larocccac V., Molino A. From *Haematococcus pluvis* microalgae a powerful antioxidant for cosmetic applications // *Chem. Eng.* 2020. Vol. 79. Pp. 271–276. <https://doi.org/10.3303/CET2079046>.
20. Barkallah M., Dammak M., Louati I., Hentati F., Hadrich B., Mechichi T., Abdelkafi S. Effect of *Spirulina platensis* fortification on physicochemical, textural, antioxidant and sensory properties of yogurt during fermentation and storage // *Lwt.* 2017. Vol. 84. Pp. 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.071>.
21. Fradinho P., Niccolai A., Soares R., Rodolfi L., Biondi N., Tredici M.R., Raymundo A. Effect of *Arthrospira platensis* (spirulina) incorporation on the rheological and bioactive properties of gluten-free fresh pasta // *Algal Research.* 2020. Vol. 45. 101743. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101743>.
22. Трухина Е.В., Базарнова Ю.Г., Аронова Е.Б. Применение биомассы микроводорослей *chlorella* в технологии макаронных изделий // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2019. Т. 8, №4. С. 153–159.
23. Cho S.H., Ji S.C., Hur S.B., Bae J., Park I.S., Song Y.C. Optimum temperature and salinity conditions for growth of green algae *Chlorella ellipsoidea* and *Nannochloris oculata* // *Fisheries Science.* 2007. Vol. 73. Pp. 1050–1056.
24. Pisal D.S., Lele S.S. Carotenoid production from microalga, *Dunaliella salina* // *Indian Journal of Biotechnology.* 2005. Vol. 4. Pp. 476–483.
25. Боровков А.Б., Гудвилевич И.Н. Апробация двухстадийного выращивания *Dunaliella salina* Теод. в полупромышленных условиях // Вопросы современной альгологии. 2017. №1. С. 5.
26. Paulenco A., Vintila A.C.N., Vlaicu A., Ciltea-Udrescu M., Galan A.M. *Nannochloris sp.* Microalgae Strain for Treatment of Dairy Wastewaters // *Microorganisms.* 2023. Vol. 11, no. 6. 1469 <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061469>.
27. Абдулагатов И.М. Алхасов А.Б., Догеев Г.Д., Тумалаев Н.Р., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Салихова А.С. Микроводоросли и их технологические применения в энергетике и защите окружающей среды // Юг России: экология, развитие. 2018. №1. С. 166–183. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-1-166-183>.
28. Базарнова Ю.Г., Балабаев А.А., Медведева А.О., Черникова Д.А., Воробьев К.В. Влияние освещенности на кинетику роста и накопление хлорофилла в биомассе *Chlorella vulgaris* // Бутлеровские сообщения. 2023. Т. 73, №1. С. 92–100. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/23-73-1-92>.
29. Xi Y., Zhang J., Kong F., Che J., Chi Z. Kinetic modeling and process analysis for photo-production of β -carotene in *Dunaliella salina* // *Bioresources and Bioprocessing.* 2022. Vol. 9, no. 1. 4. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00495-6>.
30. Dahmen-Ben Moussa I., Masmoudi M.A., Choura S., Chamkha M., Sayadi S. Extraction optimization using response surface methodology and evaluation of the antioxidant and antimicrobial potential of polyphenols in *Scenedesmus sp.* and *Chlorella sp* // *Biomass Conversion and Biorefinery.* 2021. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01850-x>.
31. Chang C.C., Yang M.H., Wen H.M., Chern J.C. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods // *Journal of food and drug analysis.* 2002. Vol. 10, no. 3. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>.
32. Курегян А.Г. Анализ БАД, содержащих астаксантин и лютеин, методом тонкослойной хроматографии // Современные проблемы науки и образования. 2015. №2-2. С. 464.
33. Курегян А.Г. Изучение каротиноидов тыквы методами спектрофотометрии и тонкослойной хроматографии // Современные проблемы науки и образования. 2015. №1-2. С. 231.

34. Загоскина Н.В., Синетова М.А., Лапшин П.В., Лось Д.А. Сравнение содержания и состава фенольных соединений у *Synechocystis sp. Sauvageau* и *Desertifilum tharense* Dadheech et Krienitz // Химия растительного сырья. 2024. №1. С. 177–185. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112643>.
35. Сергунова Е.В. Изучение состава биологически активных веществ лекарственного растительного сырья различных способов консервации и лекарственных препаратов на его основе: дисс. ... докт. фарм. наук. М., 2016. 246 с.
36. Тринеева О.В., Воропаева С.В., Сливкин А.И. Выбор оптимальной системы для определения пигментов листьев крапивы двудомной методом ТСХ // Сорбционные и хроматографические процессы. 2013. Т. 13, №2.
37. PASS Online [Электронный ресурс]. URL: <http://www.way2drug.com/passonline>.
38. Gulcin İ., Alwasel S.H. DPPH radical scavenging assay // Processes. 2023. Vol. 11, no. 8. 2248. <https://doi.org/10.3390/pr11082248>.
39. Жгунов И.С., Красноштанова А.А. Способ выделения пигментов из биомассы микроводорослей рода *Chlorella* и цианобактерий рода *Spirulina* // Приоритетные направления научных исследований. Анализ, управление, перспективы. 2023. С. 18–25.
40. Haoujar I., Cacciola F., Abrini J., Mangraviti D., Giuffrida D., Oulad El Majdoub Y., Skali Senhaji N. The contribution of carotenoids, phenolic compounds, and flavonoids to the antioxidative properties of marine microalgae isolated from Mediterranean Morocco // Molecules. 2019. Vol. 24, no. 22. 4037. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2022.249822>.
41. Страх Я.Л., Игнатовец О.С. Антиоксидантная и антирадикальная активность *in vitro* экстрактов из листьев *Rubus chamaemorus* L. (Rosaceae) // Химия растительного сырья. 2021. №4. С. 319–325. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049305>.
42. Пилипенко Т.В., Сухенко Л.Т., Егоров М.А., Астафьева О.В., Пилипенко В.Н. Антиоксидантная активность экстрактов *Tamarix ramosissima ledeb*, произрастающего в аридных условиях астраханской области // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. №2-2. С. 218–221.

Поступила в редакцию 11 октября 2024 г.

После переработки 16 апреля 2025 г.

Принята к публикации 17 апреля 2025 г.

Bazarnova Yu.G., Balabayev A.A.*, Levchuk O.R. OBTAINING PHYTOANTIOXIDANT COMPLEXES FROM BIOMASS OF INDUSTRIAL MICROALGAE SPECIES AND THE PROSPECTS OF THEIR APPLICATION

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Biotechnology and Food Production, st. Novorossiyskaya, 48, St. Petersburg, 194021, Russia, balabae-alexey97@mail.ru

The article is devoted to the issues of obtaining valuable nutraceuticals from microalgae biomass. Phytoantioxidant complexes with a high content of carotenoids, chlorophylls and phenolic compounds were isolated from the biomass of microalgae *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina* and *Nannochloris sp.* Methods for cultivating microalgae biomass and extracting phytoantioxidant complexes of carotenoids, chlorophylls and phenolic compounds are presented.

The phytochemical composition of the obtained phytoantioxidant complexes is analyzed, the results of *in silico* prediction of the biological activity of the identified biomolecules and experimentally obtained values of antioxidant activity using the DPPH method are presented. The carotenoid content in isolated [FAO]cars varies from 24 to 78 µg/g. The content of chlorophylls in the isolated [FAO] chl is 615–1420 µg/g. The content of phenolic compounds in the obtained [FAO]fs is 997–1405 µg/g.

[FAO]car, isolated from *D. Salina*, can be used as a functional food supplement with moderately high antioxidant activity or in cosmetic SPF products and pharmaceutical substances as a source of carotenoids and provitamin A, which enhance the protective properties of the skin in relation to UV radiation.

[FAO]chl isolated from *Nannochloris sp* can be recommended for use as a food coloring for soft drinks and canned sweets, as well as as a component in creams, ointments, and serums intended to accelerate the proliferation and epithelization of skin cells. [FAO]fs, isolated from *Ch. vulgaris* is recommended for use as a water-soluble functional food additive with high antioxidant activity, as well as a pharmaceutical substance for the production of drugs with antitumor, anti-inflammatory and cardioprotective properties.

Keywords: valorization of biomass of phototrophic microalgae, phytoantioxidant complexes, carotenoids, chlorophylls, phenolic compounds, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Nannochloris*.

For citing: Bazarnova Yu.G., Balabayev A.A., Levchuk O.R. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 4, pp. 317–326. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250415966>.

* Corresponding author.

References

- Trineyeva O.V. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredst*, 2017, no. 4, pp. 180–197. (in Russ.).
- Yashin A.Ya., Chernousova N.I. *Pishchevaya promyshlennost'*, 2007, no. 5, pp. 28–30. (in Russ.).
- Pokorný J. *Trends in Food Science & Technology*, 1991, vol. 2, pp. 223–227. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(91\)90695-F](https://doi.org/10.1016/0924-2244(91)90695-F).
- Gollakota K. *International Journal of Information Management*, 2008, vol. 28, no. 4, pp. 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2008.04.003>.
- Ahmadifar M., Esfahani, D.E., Ahmadifar E., Sheikhzadeh N., Mood S.M., Moradi S.Z. *Annals of Animal Science*, 2024, vol. 23, no. 4, pp. 1159–1167. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0019>.
- Wu B., Cheng H., Li X., Yang Q., Hao S., Wang C., Sun B. *Algal Research*, 2024, vol. 79, 103467. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103467>.
- Banskota A.H. Sperker S., Stefanova R., McGinn P.J., O'Leary S.J. *Journal of Applied Phycology*, 2019, vol. 31, pp. 309–318. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1523-1>.
- Li Y., Chen M. *Functional Plant Biology*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 493–501. <https://doi.org/10.1071/FP14350>.
- Li H.B., Cheng K.W., Wong C.C., Fan K.W., Chen F., Jiang Y. *Food Chem*, 2007, vol. 102, no. 3, pp. 771–776. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.022>.
- Mulders K.J., Lamers P.P., Martens D.E., Wijffels R.H. *Journal of phycology*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 229–242. <https://doi.org/10.1111/jpy.12173>.
- Viera I., Pérez-Gálvez A., Roca M. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 1, 154. <https://doi.org/10.3390/molecules24010154>.
- Hernández-Ledesma B., Herrero M. *Bioactive Compounds from Marine Foods: Plant and Animal Sources*. Madrid, 2013.
- Goiris K., Muylaert K., Fraeye I., Foubert I., De Brabanter J., De Cooman L. *Journal of applied phycology*, 2012, vol. 24, pp. 1477–1486. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9804-6>.
- Landete J.M. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, vol. 53, no. 7, pp. 706–721. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.555018>.
- Safafar H., Van Wagenen J., Möller P., Jacobsen C. *Marine drugs*, 2015, vol. 13, no. 12, pp. 7339–7356. <https://doi.org/10.3390/md13127069>.
- Manach C., Scalbert A., Morand C., Rémésy C., Jiménez, L. *The American journal of clinical nutrition*, 2004, vol. 79, no. 5, pp. 727–747. <https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727>.
- Cheyrier V., Comte G., Davies K.M., Lattanzio V., Martens S. *Plant physiology and biochemistry*, 2013, vol. 72, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.009>.
- Shen N., Wang T., Gan Q., Liu S., Wang L., Jin B. *Food Chemistry*, 2022, vol. 383, 132531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>.
- Marinoa T., Iovinea A., Casellab P., Martinoc M., Chianesea S., Laroccac V., Molino A. *Chem. Eng.*, 2020, vol. 79, pp. 271–276. <https://doi.org/10.3303/CET2079046>.
- Barkallah M., Dammak M., Louati I., Hentati F., Hadrich B., Mechichi T., Abdelkafi S. *Lwt*, 2017, vol. 84, pp. 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.071>.
- Fradinho P., Niccolai A., Soares R., Rodolfi L., Biondi N., Tredici M.R., Raymundo A. *Algal Research*, 2020, vol. 45, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101743>.
- Trukhina Ye.V., Bazarnova Yu.G., Aronova Ye.B. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 2019, vol. 8, no. 4, pp. 153–159. (in Russ.).
- Cho S.H., Ji S.C., Hur S.B., Bae J., Park I.S., Song Y.C. *Fisheries Science*, 2007, vol. 73, pp. 1050–1056.
- Pisal D.S., Lele S.S. *Indian Journal of Biotechnology*, 2005, vol. 4, pp. 476–483.
- Borovkov A.B., Gudvilovich I.N. *Voprosy sovremennoy al'gologii*, 2017, no. 1, p. 5. (in Russ.).
- Paulenco A., Vintila A.C.N., Vlaicu A., Ciltea-Udrescu M., Galan A.M. *Microorganisms*, 2023, vol. 11, no. 6, 1469. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061469>.
- Abdulagatov I.M. Alkhasov A.B., Dogeyev G.D., Tumalayev N.R., Aliyev R.M., Badavov G.B., Salikhova A.S. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye*, 2018, no. 1, pp. 166–183. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-1-166-183>. (in Russ.).
- Bazarnova Yu.G., Balabayev A.A., Medvedeva A.O., Chernikova D.A., Vorob'yev K.V. *Butlerovskiye soobshcheniya*, 2023, vol. 73, no. 1, pp. 92–100. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/23-73-1-92>. (in Russ.).
- Xi Y., Zhang J., Kong F., Che J., Chi Z. *Bioresources and Bioprocessing*, 2022, vol. 9, no. 1, 4. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00495-6>.
- Dahmen-Ben Moussa I., Masmoudi M.A., Choura S., Chamkha M., Sayadi S. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01850-x>.
- Chang C.C., Yang M.H., Wen H.M., Chern J.C. *Journal of food and drug analysis*. 2002, vol. 10, no. 3. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>.
- Kuregyan A.G. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 2-2, p. 464. (in Russ.).
- Kuregyan A.G. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 1-2, p. 231. (in Russ.).
- Zagoskina N.V., Sinetova M.A., Lapshin P.V., Los' D.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2024, no. 1, pp. 177–185. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112643>. (in Russ.).
- Sergunova Ye.V. *Izucheniye sostava biologicheskii aktivnykh veshchestv lekarstvennogo rasti-tel'nogo syr'ya razlichnykh sposobov konservatsii i lekarstvennykh preparatov na yego osnove: diss. ... dokt. farm. nauk.* [Study of the

- composition of biologically active substances of medicinal plant raw materials of various preservation methods and medicinal products based on them: diss. ... Doctor of Pharmaceutical Sciences]. Moscow, 2016, 246 p. (in Russ.).
36. Trineyeva O.V., Voropayeva S.V., Slivkin A.I. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*, 2013, vol. 13, no. 2. (in Russ.).
 37. *PASS Online*. URL: <http://www.way2drug.com/passonline>.
 38. Gulcin İ., Alwasel S.H. *Processes*, 2023, vol. 11, no. 8, 2248. <https://doi.org/10.3390/pr11082248>.
 39. Zhgunov I.S., Krasnoshtanova A.A. *Prioritetnyye napravleniya nauchnykh issledovaniy. Analiz, upravleniye, perspektivy*. 2023, pp. 18–25. (in Russ.).
 40. Haoujar I., Cacciola F., Abrini J., Mangraviti D., Giuffrida D., Oulad El Majdoub Y., Skali Senhaji N. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 22, 4037. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2022.249822>.
 41. Strakh Ya.L., Ignatovets O.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2021, no. 4, pp. 319–325. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049305>. (in Russ.).
 42. Pilipenko T.V., Sukhenko L.T., Yegorov M.A., Astaf'yeva O.V., Pilipenko V.N. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2017, no. 2-2, pp. 218–221. (in Russ.).

Received October 11, 2024

Revised April 16, 2025

Accepted April 17, 2025

Сведения об авторах

Базарнова Юлия Генриховна – доктор технических наук, директор, j.bazarnowa2012@yandex.ru

Балабаев Алексей Александрович – аспирант, заведующий лабораторией, balabaev-alexey97@mail.ru

Левчук Ольга Романовна – аспирант, инженер, levchuk.or@edu.spbstu.ru

Information about authors

Bazarnova Yulia Genrikhovna – Doctor of Technical Sciences, Director, j.bazarnowa2012@yandex.ru

Balabaev Alexey Aleksandrovich – graduate student, head of laboratory, balabaev-alexey97@mail.ru

Levchuk Olga Romanovna – graduate student, engineer, levchuk.or@edu.spbstu.ru