

УДК 582.272:579.222:57.022:543.9

## СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ МИКОТОКСИНОВ В ФУКУСОВЫХ ВОДОРΟΣЛЯХ БЕЛОГО МОРЕЯ

© 2022 г. Г. П. Кононенко<sup>1, \*</sup>, А. А. Буркин<sup>1</sup>, А. А. Георгиев<sup>2</sup>, М. Л. Георгиева<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Федеральный научный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К.И. Скрябина и Я.Р. Коваленко, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Биологический факультет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт по изысканию новых антибиотиков имени Г.Ф. Гаузе, Москва, Россия

\*e-mail: kononenkogp@mail.ru

Поступила в редакцию 18.02.2022 г.

После доработки 26.04.2022 г.

Принята к публикации 16.08.2022 г.

Методом иммуноферментного анализа выполнена сравнительная оценка содержания низкомолекулярных вторичных метаболитов микромицетов (микотоксинов) в талломах бурых водорослей *Fucus vesiculosus*, *F. distichus* и *Ascophyllum nodosum*, собранных в Кандалакшском заливе Белого моря. У всех исследованных фукоидов выявлен весь набор анализируемых микотоксинов, при этом содержание веществ сильно варьирует. Показано более высокое содержание микотоксинов для *F. vesiculosus* и *F. distichus* по сравнению с *A. nodosum*.

**Ключевые слова:** *Fucus*, *Ascophyllum*, бурые водоросли, экоформы, микотоксины, иммуноанализ, Белое море

**DOI:** 10.31857/S0030157422050070

В Белом море важнейшую роль в донных сообществах играют бурые водоросли (отд. Ochrophyta, класс Rhaeophyceae), среди них фукусовые водоросли (пор. Fucales) определяют облик донной растительности литорали и верхней сублиторали [4]. Известно пять видов беломорских фукоидов: *Ascophyllum nodosum*, *Fucus distichus*, *F. serratus*, *F. vesiculosus* и *Pelvetia canaliculata* [7, 14]. Характерной особенностью фукусовых водорослей является их способность к образованию экологических форм (экад), которые морфологически и анатомически существенно отличаются от типичных форм. В Кандалакшском заливе Белого моря в местообитаниях с рыхлыми грунтами (соленые марши, песчаная и илистая литораль, эстуарии) были обнаружены экады *A. nodosum* и *F. vesiculosus*. Одни из них представляют собой неприкрепленные, карликовые талломы, погруженные базальными концами в грунт (*A. nodosum* экад *muscooides* и *F. vesiculosus* экад *muscooides*), а другие – свободно лежащие на дне бентоплейстонные формы (*A. nodosum* экад *scorpioides* и *F. vesiculosus* экад *vehovianus*) [11, 12]. Помимо литоральных экад фукоидов в сублиторали произрастает *F. vesiculosus* f. *giganteus* [4]. Генетические исследования и наблюдения в природе продемонстрировали трансформацию

экад одного вида друг в друга и генетическое единство экад этих видов макроводорослей [13].

Изучение грибов, связанных с водорослями-макрофитами, развивается со второй половины 20 века. Грибы образуют паразитические, сапротрофные, мутуалистические, патогенные или бессимптомные ассоциации со своими водорослевыми хозяевами; могут присутствовать во внутренних тканях как эндофиты или на поверхности как эпифиты [24, 29, 32]. Более 150 видов грибов из 80 родов известно в ассоциациях с макроводорослями [23], наиболее часто отмечают представителей аскомицетов из анаморфных родов (*Acremonium*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Dendryphiella*, *Trichoderma*, *Phoma*), которые встречаются и в других местообитаниях, но есть и специфические виды, выявленные только в ассоциациях с водорослями (*Stigmatidium ascophylli*) [1, 2, 21, 28, 29, 32, 34, 36, 38]. Морские грибы считаются богатым источником уникальных вторичных метаболитов, охарактеризовано более 1000 новых соединений, из них 20% были получены из грибов, ассоциированных с макроводорослями [23, 30]. Эти метаболиты имеют большое структурное разнообразие (поликетиды, терпеноиды, пептиды, алкалоиды и др.) и значительный потенциал ис-

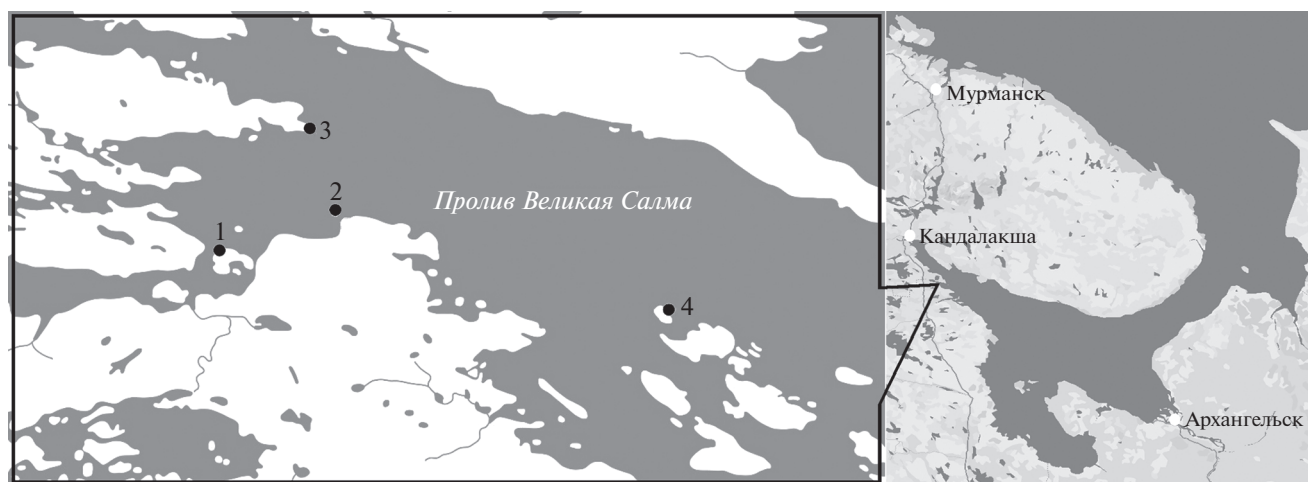


Рис. 1. Район исследования: 1 – о-в Кривой (66°30' N, 33°08' E), 2 – о-в Крестовый (66°31' N 33°11' E), 3 – п-ов Киндо (66°32' N, 33°11' E), 4 – о-в Молочница (66°30' N 33°22' E).

пользования в различных биотехнологических направлениях [20, 27, 31, 33].

В то же время микромицеты могут продуцировать низкомолекулярные вторичные метаболиты, известные как токсины для теплокровных животных [17, 37]. Кроме многочисленных указаний на негативное действие этих соединений на живые системы, их считают инициаторами ответных реакций растения-хозяина на воздействие внешних факторов среды [18, 22]. Наиболее изучены микотоксины, продуцируемые грибами из родов *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria* и *Cladosporium*, которые встречаются в почве, на сельскохозяйственных растениях и продуктах питания [17, 19]. Грибы этих родов отмечают и в морских местообитаниях, в том числе в микобиоте фукусовых водорослей Белого моря [2, 8] и других морей [38]. Проведенный скрининг-анализ талломов фукусовых макроводорослей выявил наличие в них широкого спектра микотоксинов [3, 9]. В данной работе приведена сравнительная оценка состава и содержания микотоксинов (16 веществ) в талломах видов *F. vesiculosus*, *F. distichus*, *A. nodosum* и их экологических форм.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы талломов бурых водорослей отбирали в середине августа 2019 г. в Кандалакшском заливе Белого моря в типичных местообитаниях, характерных для данных макрофитов (рис. 1, табл. 1). Содержание микотоксинов было исследовано в трех видах и их экологических формах: *F. vesiculosus* (типичная форма, *F. vesiculosus* f. *giganteus*, *F. vesiculosus* ecad *muscoides*, *F. vesiculosus* ecad *vehovianus*); *A. nodosum* (типичная форма, *A. nodosum* ecad *scorpioides*, *A. nodosum* ecad *muscoides*); *F. distichus* (*F. distichus* f. *edentatus*, *F. distichus* f.

*latifrons*). При наличии обрастаний, они тщательно удалялись с поверхности таллома. Образцы двух карликовых форм (*F. vesiculosus* ecad *muscoides* и *A. nodosum* ecad *muscoides*), а также образцы *F. vesiculosus* ecad *vehovianus* составляли из нескольких талломов, чтобы вес сухого образца был не менее 1 г.

Непосредственно после сбора (в течение 1–2 ч) образцы высушивали в токе воздуха при температуре 60°C, транспортировали, сохраняя в суховоздушном состоянии, и затем измельчали в лабораторной мельнице. Для экстракции применяли смесь ацетонитрила и воды в объемном соотношении 84 : 16 при расходе 10 мл на 1 г навески. Экстракты после 10-кратного разбавления буферным раствором использовали для непрямого конкурентного иммуноферментного анализа (ИФА). Микотоксины – Т-2 токсин (Т-2), диацетоксисцирпенол (ДАС), дезоксиниваленол (ДОН), зеараленон (ЗЕН), фумонизины (ФУМ), альтернариол (АОЛ), охратоксин А (ОА), цитринин (ЦИТ), афлатоксин В<sub>1</sub> (АВ<sub>1</sub>), стеригматоцистин (СТЕ), циклопиазоновую кислоту (ЦПК), микофеноловую кислоту (МФК), РR-токсин (РR), эмодин (ЭМО), роридин А (РОА) и эргоалкалоиды (ЭА) анализировали с помощью аттестованных коммерческих и исследовательских иммуноферментных тест-систем [6], данные обсчитывали в программе Microsoft Office Excel и представляли в виде минимального, максимального и среднего арифметического значений. Нижние пределы количественных измерений соответствовали 85% уровню связывания антител, наименьшие содержания в объекте, которые могли быть определены данным методом, составили 1 (АВ<sub>1</sub>, ЭА), 2 (Т-2, ОА, СТЕ), 5 (РОА), 10 (АОЛ, МФК, ЗЕН, ЭМО, ЦИТ, ЦПК), 40 (ДОН, ФУМ), 100 (ДАС, РR) нг/г.

**Таблица 1.** Характеристика образцов водорослей, отобранных в середине августа 2019 г. в проливе Великая Салма (Кандалакшский залив, Белое море)

Таксон, зона сбора	n	в том числе по местам сбора			
		1	2	3	4
<i>Ascophyllum nodosum</i> (L.) Le Jolis*, средняя/нижняя литораль	10	7	3	—	—
<i>A. nodosum</i> ecad <i>scorpioides</i> (Horn.) Nauck, литораль	7	7	—	—	—
<i>A. nodosum</i> ecad <i>muscooides</i> (Turner) Maximova et Mugue, верхняя литораль	3	3	—	—	—
<i>Fucus distichus</i> f. <i>edentatus</i> (De la Pylaie) Ju. Petrov, нижняя литораль/сублитораль	13	—	3	10	—
<i>F. distichus</i> f. <i>latifrons</i> (Foslie) Ju. Petrov, сублитораль/нижняя литораль	7	7	—	—	—
<i>F. vesiculosus</i> L., средняя/нижняя литораль	10	7	3	—	—
<i>F. vesiculosus</i> ecad <i>vehovianus</i> Maximova et Mugue, литораль	4	4	—	—	—
<i>F. vesiculosus</i> ecad <i>muscooides</i> (Cotton) Baker et Bohling, верхняя литораль	1	1	—	—	—
<i>F. vesiculosus</i> f. <i>giganteus</i> V. Vozh., сублитораль	4	—	—	—	4

Примечание: n — число проб; прочерк означает, что образцы в данном месте не отбирали; места сбора: 1 — о-в Кривой (66°30' N, 33°08' E), 2 — о-в Крестовый (66°31' N 33°11' E), 3 — п-ов Киндо (66°32' N, 33°11' E), 4 — о-в Молочница (66°30' N 33°22' E).  
\* Авторы видов даны согласно [7].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В талломах обследованных фукусовых водорослей присутствовали все анализируемые микотоксины (табл. 2). Если сравнивать метаболические профили (состав и количественное содержание микотоксинов) в разных фукоидах, то можно отметить некоторые особенности.

У *F. vesiculosus*, как и описано ранее [3, 9], уровни ДАС, ДОН, ФУМ, АОЛ, ЦПК, PR, МФК и ЭА достигали десятков тысяч нг/г, наименьшие значения были у Т-2, ОА и АВ<sub>1</sub> (200–510 нг/г), а для остальных микотоксинов составляли несколько тысяч нг/г. Бентоплейстонная форма *F. vesiculosus* ecad *vehovianus* заметно уступала по содержанию большинства метаболитов типичной прикрепленной форме, сходными были лишь концентрации ФУМ и PR. У карликового фукуса *F. vesiculosus* ecad *muscooides* содержание всех микотоксинов было еще меньше — уровни Т-2, ОА и АВ<sub>1</sub> соответствовали значениям 15–26 нг/г, для ДАС, АОЛ, ФУМ, PR составили 1230–7940 нг/г, а концентрации остальных веществ находились в диапазоне от 100 до 515 нг/г. Напротив, для сублиторальной формы *F. vesiculosus* f. *giganteus* выявлены максимальные показатели содержания микотоксинов, как по сравнению с другими экоформами *F. vesiculosus*, так и среди всех исследованных фукоидов. Возможно, такие высокие значения связаны с тем, что на талломах *F. vesiculosus* f. *giganteus* в природных условиях присутствует большее количество эпифитов и это способствует развитию специфической микобиоты.

Для исследованных форм *F. distichus* метаболические профили были сходными между собой, кроме высокого содержания ДОН, МФК и ЭА в *F. distichus* f. *latifrons* и АОЛ в *F. distichus* f. *edentatus*.

У прикрепленной формы *A. nodosum*, как и ранее [3, 9], была выявлена меньшая, чем у *F. vesiculosus* интенсивность накопления микотоксинов — из всего перечня веществ сверхвысокие содержания имели только ДАС и PR (более 10 000 нг/г) и наименьшие — Т-2, ОА и АВ<sub>1</sub> (38–74 нг/г). Метаболический профиль бентоплейстонной экоформы *A. nodosum* ecad *scorpioides* значительно отличался от профиля типичной прикрепленной формы *A. nodosum* — отмечено снижение количеств Т-2, ДОН и МФК, возрастание ФУМ, АОЛ, особенно резкое — ЦИТ и PR, при сходном содержании других метаболитов. У карликовой формы *A. nodosum* ecad *muscooides*, заметна общая тенденция к снижению содержания микотоксинов, особенно по Т-2, ДОН, а количества АОЛ и ЦИТ сходны с найденными у *A. nodosum*. Интересно, что внутри талломов у этой экады выявлено меньшее разнообразие грибов, чем у типичной формы, и представители родов *Fusarium*, *Alternaria*, *Phoma*, *Aspergillus*, *Cladosporium* отсутствовали [8]. В целом, направленность изменений в содержании микотоксинов была аналогична найденной для *F. vesiculosus* и *F. vesiculosus* ecad *muscooides*, но сравнение состава внутренней микобиоты у них не проводилось.

Для всех макрофитов были отмечены значительные различия в содержании трихотеценовых микотоксинов (Т-2, ДАС, ДОН), продуцируемых, в основном, грибами из рода *Fusarium*. Количество как ДАС, так и ДОН были на 1–2 порядка больше, чем Т-2. Максимальные средние значения ДАС (более 20 тыс. нг/г) отмечены для *F. vesiculosus* и *F. vesiculosus* f. *giganteus*, высокие значения характерны для обеих форм *F. distichus*, для остальных макрофитов содержание этого

Таблица 2. Встречаемость и содержание микотоксинов в талломах водорослей родов *Fucus* и *Ascophyllum*

Микотоксин	Содержание микотоксинов, мин.—макс., среднее (нг/г)									
	<i>F. vesiculosus</i> <i>n</i> = 10	<i>F. vesiculosus</i> есад <i>vehovianus</i> <i>n</i> = 4	<i>F. vesiculosus</i> есад <i>muscooides</i> <i>n</i> = 1	<i>F. vesiculosus</i> <i>f. giganteus</i> <i>n</i> = 4	<i>F. distichus</i> <i>f. edentatus</i> <i>n</i> = 13	<i>F. distichus</i> <i>f. latifrons</i> <i>n</i> = 7	<i>A. nodosum</i> <i>n</i> = 10	<i>A. nodosum</i> <i>f. scorpioides</i> <i>n</i> = 7	<i>A. nodosum</i> <i>n</i> = 3	
Т-2	3–470 235	40–265 120	15	630–1120 845	10–400 83	16–120 49	24–150 45	3–20 14	4–12 7	
ДАС	10840–44670 23510	6030–8510 6980	6310	18200–23200 20900	3980–31700 16400	8410–16400 13400	2510–12400 5770	945–8510 5850	3350–5010 4110	
ДОН	100–50120 18360	1740–7940 5050	515	48100–141200 79800	230–10000 3200	2000–33900 12400	725–6150 1600	100–1120 660	54–255 150	
ЗЕН	250–2750 1230	515–1070 740	340	1550–5370 3850	330–3980 1060	525–5010 2110	125–1480 500	315–795 530	200–325 280	
ФУМ	1230–11220 5680	2660–9660 6360	3020	16600–30900 25700	870–25100 8360	3060–15800 8790	685–4070 1390	2750–6240 4270	1590–2540 2040	
АОЛ	1000–24000 13000	2290–8910 5010	1230	11200–28200 20800	790–31600 9060	500–6310 3410	260–1260 595	290–4840 1550	275–740 550	
ОА	55–455 200	40–79 58	25	165–470 280	83–1000 290	250–680 485	31–200 74	48–125 91	25–38 32	
ЦИТ	400–6310 3045	500–795 640	265	2820–5250 3650	680–7940 2890	1000–2340 1740	270–945 490	630–2040 1260	76–415 230	
АВ <sub>1</sub>	78–830 510	47–180 135	26	525–1510 945	58–500 225	100–315 210	25–94 38	23–85 54	8–25 16	
СТЕ	225–4730 1840	310–470 380	200	4170–5010 4670	400–4470 1220	630–3020 1700	105–300 185	130–525 345	47–200 125	
ЦПК	130–11500 3770	195–760 440	100	3390–10000 5540	100–3160 670	400–2600 1570	125–860 325	140–795 520	50–130 83	
PR	760–28200 17000	13200–25100 17900	7940	28200–39800 36900	1260–26600 9410	7590–16600 12100	100–350 160	2920–25100 17400	2290–8320 6070	
МФК	795–19300 5560	770–2240 1440	405	10000–44700 26800	675–22400 3950	3160–20000 9760	3800–19300 9030	405–1970 1430	130–510 280	
ЭМО	25–5010 2000	160–245 190	135	3160–10000 5220	48–1680 580	130–560 300	32–305 105	60–500 230	63–200 130	
РОА	40–4170 1350	495–895 620	380	1410–7940 4140	68–1620 370	130–400 220	170–700 230	100–350 235	79–150 125	
ЭА	345–31600 12300	795–3470 2760	290	10000–30900 21900	200–10000 2420	3160–14000 9000	315–1260 440	100–1180 560	32–200 120	

Примечание. *n* – число исследованных образцов.

токсина варьировало около 5–10 тыс. нг/г. Максимальное количество ДОН выявлено у *F. vesiculosus* f. *giganteus* и составило 79800 нг/г, высокое содержание ДОН отмечено у *F. vesiculosus* (около 20 тыс. нг/г) и *F. distichus* f. *latifrons* (около 12 тыс. нг/г), для остальных макрофитов — в среднем от 150 до 5050 нг/г. По количеству Т-2 выделяется *F. vesiculosus* f. *giganteus* с максимальным показателем — 845 нг/г, при этом для других фукоидов оно было значительно ниже и варьировало в пределах 10–200 нг/г. Из других фузариотоксинов содержание ЗЕН было максимальным у *F. vesiculosus* f. *giganteus* (3850 нг/г), составляло более 1 тыс. нг/г у *F. vesiculosus* и обеих форм *F. distichus*, а количество ФУМ во всех образцах было более 2 тыс. нг/г.

В фукусовых водорослях также были выявлены токсины, свойственные грибам других таксонов. Так, максимальное содержание АОЛ было у *F. vesiculosus* f. *giganteus* (ср. 20800 нг/г), а минимальные (около 600 нг/г) — у *A. nodosum* и *A. nodosum* ecad *muscooides*. Количества антрахинона ЭМО и макроциклического трихотецена РОА, по сравнению с другими микотоксинами были умеренными, составляя сотни или тыс. нг/г. Значительное содержание ЭА выявлено у *F. vesiculosus*, *F. vesiculosus* f. *giganteus* и *F. distichus* f. *latifrons*.

На данном этапе исследований невозможно делать выводы о том, какие именно виды грибов, ассоциированные с морскими макрофитами, ответственны за продукцию микотоксинов. Однако уже очевидно, что микобиота макрофитов довольно разнообразна и связана в единую систему как с организмом-хозяином и условиями его обитания, так и с другими эпibiонтами, в первую очередь, посредством многочисленных вторичных метаболитов. Токсины, синтезируемые грибами, разнообразны по строению, и для многих из них известна возможность синтеза грибами разных видов. Современные методы способствуют обнаружению как новых микотоксинов, так и новых продуцентов известных ранее веществ [35].

Полученные результаты по содержанию микотоксинов в фукоидах, несомненно, важны и с практической точки зрения. Морские водоросли издавна служат объектом промысла и марикультуры, в ряде стран им традиционно отводится заметное место в рационе населения, они широко используются как биологически активные пищевые добавки, а также во многих других сферах человеческой деятельности — в кормлении сельскохозяйственных животных, птицы и прудовой рыбы, как удобрения, для очистки сточных вод и прочих хозяйственных нужд [10, 15, 16, 25]. В России при изготовлении водорослевой муки и кормовой крупки, предназначенной для сельскохозяйственных животных, птиц и прудовой рыбы, предусмотрено использование фукусов, ламина-

рий, а также отходов экстракционной переработки анфельции, ламинарии, фукусов, фуцеллярии, филлофоры [5]. Документированные свидетельства отравлений фукоидами не известны. В доступной литературе единственная работа по микотоксинам макрофитов посвящена определению фузариотоксинов в 50 пробах келпов (в данном случае это были сухие макрофиты из супермаркета) из китайской провинции Шаньдун. В 43 пробах были детектированы моноацетаты ДОН в количествах от 15.3 до 162.5 мкг/кг, при этом другие анализированные фузариотоксины (ДОН, ниваленол, фузаренон Х, Т-2 токсин и ЗЕН) не обнаружены [26]. Дальнейшее изучение микотоксинов в водорослях-макрофитах как Белого моря, так и других морей, имеет важное прикладное значение.

Таким образом, впервые получены сравнительные данные о комплексе микотоксинов у трех видов бурых фукусовых водорослей и их экотипов. Выявлено наличие 16 различных микотоксинов, что говорит о присутствии разнообразных видов грибов, ассоциированных с макрофитами. Выявленное высокое содержание некоторых микотоксинов в талломах фукоидов указывает на необходимость повышенного внимания к их использованию.

Источники финансирования: Работа Георгиевой М.Л. (участие в анализе полученных результатов) выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-1396).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнова Е.Н., Грум-Гржимайло О.А., Коновалова О.П., Марфенина О.Е. 50 лет микологических исследований на Беломорской биостанции им. Н.А. Перцова: основные направления, итоги, перспективы // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. Биология. 2014. № 1. С. 29–46.
2. Бубнова Е.Н., Киреев Я.В. Сообщества грибов на талломах бурых водорослей рода *Fucus* в Кандакшском заливе Белого моря // Микология и фитопатология. 2009. Т. 43. Вып. 5. С. 388–397.
3. Буркин А.А., Кононенко Г.П., Георгиев А.А., Георгиева М.Л. Токсичные метаболиты микромицетов в бурых водорослях семейств *Fucaceae* и *Laminariaceae* из Белого моря // Биология моря. 2021. Т. 47. № 1. С. 40–44.
4. Возжинская В.Б. Донные макрофиты Белого моря. М.: Наука, 1986. 191 с.
5. ГОСТ 22455–77 Мука и крупка кормовая водорослевая. Технические условия. 1978. 4 с.
6. ГОСТ Р 52471–2005 Корма. Иммуноферментный метод определения микотоксинов. 2006. 12 с.
7. Каталог биоты Беломорской биологической станции МГУ / Под ред. Чесунова А.В., Калякиной Н.М., Бубновой Е.Н. М.: Т-во научных изданий КМК, 2008. 384 с.

8. Коновалова О.П., Бубнова Е.Н. Грибы на бурых водорослях *Ascophyllum nodosum* и *Pelvetia canaliculata* в Кандалакшском заливе Белого моря // Микология и фитопатология. 2011. Т. 45. Вып. 3. С. 240–248.
9. Кононенко Г.П., Буркин А.А., Георгиев А.А., Георгиева М.Л. Микотоксины в макроводорослях из пролива Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря // Биология моря. 2022. Т. 48. № 1. С. 53–61.
10. Коровкина Н.В., Богданович Н.И., Кутакова Н.А. Экстракты бурых водорослей для обогащения рациона питания природными минеральными веществами // Химия растительного сырья. 2008. № 4. С. 167–169.
11. Максимова О.В. Обзор исследований карликовых и бентоплейстонных фукусовых (Fucales, Phaeophyceae) // Ботанический журнал. 2007. Т. 92. № 6. С. 858–877.
12. Максимова О.В., Мюге Н.С. Новые для Белого моря формы фукоидов (Fucales, Phaeophyceae): морфология, экология, происхождение // Ботанический журнал. 2007. Т. 92. № 7. С. 965–986.
13. Максимова О.В., Симакова У.В., Неретина Т.В. Морфологическое разнообразие при генетическом единстве: *Fucus vesiculosus* и *Ascophyllum nodosum* (Белое море). В кн.: Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге. Материалы IV Всеросс. научной конф. с междунар. участием. СПб: Реноме, 2018. С. 287–291.
14. Михайлова Т.А., Максимова О.В., Бубнова Е.Н. Бурые водоросли. В кн.: Флора и фауна Белого моря: иллюстрированный атлас / Ред. А.Б. Цетлин, А.Э. Жадан, Н.Н. Марфенин. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. С. 397–413.
15. Муравьева Е.А. Комплексная технология получения экстрактивных БАВ из бурых водорослей Белого моря // Рыбпром. 2010. № 3. С. 54–57.
16. Al-Dulaimi O., Rateb M.E., Hursthouse A.S. et al. The Brown seaweeds of Scotland, their importance and applications // Environments. 2021. V. 8. № 6: 59. <https://doi.org/10.3390/environments8060059>
17. Alshannaq A., Yu J.-H. Occurrence, toxicity, and analysis of major mycotoxins in food // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. V. 14. № 6: 632. <https://doi.org/10.3390/ijerph14060632>
18. Arbona V., Manzi M., Ollas C., Gmez-Cadenas A. Metabolomics as a tool to investigate abiotic stress tolerance in plants // International Journal of Molecular Sciences. 2013. V. 14. № 3. P. 4885–4911.
19. Didwania N., Joshi M. Mycotoxins: A critical review on occurrence and significance // International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. 2013. V. 5. I. 3. P. 1014–1019.
20. El-Bondkly E.A.M., El-Bondkly A.A.M., El-Bondkly Ay.A.M. Marine endophytic fungal metabolites: A whole new world of pharmaceutical therapy exploration // Heliyon. 2021. V. 7. I. 3. e06362. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06362>
21. Flewelling A.J., Johnson J.A., Gray C.A. Isolation and bioassay screening of fungal endophytes from North Atlantic marine macroalgae // Botanica Marina. 2013. V. 56. P. 287–297. <https://doi.org/10.1515/bot-2012-0224>
22. Hong J., Yang L., Zhang D., Shi J. Plant metabolomics: an indispensable system biology tool for plant science // International Journal of Molecular Sciences. 2016. V. 17. № 6: 767. <https://doi.org/10.3390/ijms17060767>
23. Ji N.Y., Wang B.G. Mycochemistry of marine algicidal fungi // Fungal diversity. 2016. V. 80. № 1. P. 301–342. <https://doi.org/10.1007/s13225-016-0358-9>
24. Kohlmeyer J., Kohlmeyer E. Marine Mycology, the higher fungi. New York: Acad. Press, 1979. 691 p.
25. Leandro A., Pereira L., Gonçalves A.M.M. Diverse applications of marine macroalgae // Marine Drugs. 2020. V. 18. № 1: 17. <https://doi.org/10.3390/md18010017>
26. Li Y., Sun M., Mao X., et al. Mycotoxins contaminant in kelp: a neglected dietary exposure pathway // Toxins. 2018. V. 10. № 11: 481. <https://doi.org/10.3390/toxins10110481>
27. Mohamed G.A., Ibrahim S.R.M. Untapped potential of marine-associated *Cladosporium* species: an overview on secondary metabolites, biotechnological relevance, and biological activities // Mar. Drugs. 2021. V. 19. № 11: 645. <https://doi.org/10.3390/md19110645>
28. Ogaki M.B., de Paula M.T., Ruas D. et al. Marine fungi associated with Antarctic macroalgae // The ecological role of microorganisms in the Antarctic environment. Springer Polar Sciences / Ed. Castro-Sowinski S. Springer, 2019. P. 239–255. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-02786-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02786-5_11)
29. Raghukumar S. Fungi in coastal and oceanic marine ecosystems. Marine Fungi. Springer, 2017. 378 p.
30. Rateb M.E., Ebel R. Secondary metabolites of fungi from marine habitats // Natural Product Reports. 2011. V. 28. P. 290–344. <https://doi.org/10.1039/c0np00061b>
31. Singh R.P., Kumaru P., Reddy C.R.K. Antimicrobial compounds from seaweeds-associated bacteria and fungi // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2015. V. 99. P. 1571–1586. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6334-y>
32. Suryanarayanan T., Venkatachalam A., Thirunavukkarasu N. et al. Internal mycobiota of marine macroalgae from the Tamilnadu coast: distribution, diversity and biotechnological potential // Botanica Marina. 2010. V. 53. I. 5. P. 457–468. <https://doi.org/10.1515/bot.2010.045>
33. Teixeira T.R., Santos G.S.d., Armstrong L. et al. Antitumor potential of seaweed derived-endophytic fungi // Antibiotics. 2019. V. 8. № 4: 205. <https://doi.org/10.3390/antibiotics8040205>
34. Tourneroche A., Lami R., Burgaud G. et al. The bacterial and fungal microbiota of *Saccharina latissima* (Laminariales, Phaeophyceae) // Front. Mar. Sci. 2020. V. 7: 587566. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.587566>
35. Van den Brand A.D., Bulder A.S. An overview of mycotoxins relevant for the food and feed supply chain: using

- a novel literature screening method. The Netherlands: RIVM, 2020. 48 p.
36. Xu H., Deckert R.J., Garbary D.J. *Ascophyllum* and its symbionts. X. Ultrastructure of the interaction between *A. nodosum* (Phaeophyceae) and *Mycophycias ascophylli* (Ascomycetes) // Botany. 2008. V. 86. P. 185–193.
37. Zaki M.M., El-Midany S.A., Shaheen H.M., Rizzi L. Mycotoxins in animals: occurrence, effects, prevention and management // Journal of Toxicology and Environmental Health Science. 2012. V. 4. № 1. P. 13–28. <https://doi.org/10.5897/JTEHS11.072>
38. Zuccaro A., Schoch C.L., Spatafora J.W., Kohlmeyer J., Draeger S., Mitchell J.I. Detection and identification of fungi intimately associated with the brown seaweed *Fucus serratus* // Appl. Environ. Microbiol. 2008. V. 74. P. 931–941.

## Composition and Content of Mycotoxins in the White Sea Fucoids

G. P. Kononenko<sup>a, #</sup>, A. A. Burkin<sup>a</sup>, A. A. Georgiev<sup>b</sup>, M. L. Georgieva<sup>b, c</sup>

<sup>a</sup>All-Russian Research Institute for Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology – Branch of Federal State Budget Scientific Institution “Federal Scientific Center – K. I. Skryabin, Ya. R. Kovalenko All-Russian Research Institute of Experimental Veterinary Medicine, Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Moscow State University, Faculty of Biology, Moscow, Russia

<sup>c</sup>Gause Institute of New Antibiotics, Moscow, Russia

<sup>#</sup>e-mail: kononenkogp@mail.ru

A comparative assessment of the content of low-molecular secondary metabolites of micromycetes (mycotoxins) in the thalli of brown algae *Fucus vesiculosus*, *F. distichus* and *Ascophyllum nodosum*, collected in the Kandalaksha Bay of the White Sea, was performed using ELISA. All studied fucoids revealed the entire set of analyzed mycotoxins, while the content of substances varies greatly. A higher mycotoxin content was shown for *F. vesiculosus* and *F. distichus* compared to *A. nodosum*.

**Keywords:** *Fucus*, *Ascophyllum*, brown algae, seaweeds, ecads, mycotoxins, ELISA, the White Sea