

УДК 542.06+577.1

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИФЕНОЛОВ БУРЫХ ВОДОРОСЛЕЙ МОРЕЙ АРКТИКИ И СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

© *Е.Д. Облучинская**, *Л.В. Захарова*

Мурманский морской биологический институт РАН, ул. Владимирская, 17, Мурманск, 183010 (Россия), e-mail: okaterine@yandex.ru

Проведено сравнение содержания полифенолов в бурых водорослях Баренцева, Белого морей, а также акваторий Северной Атлантики (Норвежского моря, залива Факсафлоуи Атлантического океана), расположенных на территории России, Норвегии, Гренландии и Исландии. Было выявлено, что наиболее продуктивным сырьем для извлечения полифенольных соединений являются бурые водоросли *Fucus vesiculosus*, произрастающие в бухте Завалишина Баренцева моря (Россия): здесь было отмечено наиболее высокое содержание полифенолов (14.4%) в летний период 2019 г. Также высокое содержание полифенолов выявлено в *F. vesiculosus* в летний период из Белого моря на о. Большой горелый (13.3%) (Россия), а также в Норвежском море, мыс Сюдсписсен (11.6%) (Норвегия). Минимальное содержание полифенолов было обнаружено в *Fucus spiralis* (0.7% а.с.м.) на побережье Исландии (з. Факсафлоуи, море Ирмингера), низкое содержание полифенолов было характерно для всех видов водорослей (*F. vesiculosus*, *F. spiralis*, *Ascophyllum nodosum*) из этой локации (0.7–2.4%). Трехфакторный дисперсионный анализ (MANOVA) на примере трех видов водорослей (*F. vesiculosus*, *F. spiralis*, *A. nodosum*) показал, что все исследуемые факторы (место сбора, вид водорослей, фаза размножения) являются значимыми. Наиболее значимым фактором, влияющим на накопление полифенолов бурыми водорослями, является место их произрастания. Высокое содержание полифенолов в изученных нами видах водорослей из российских акваторий позволяет рекомендовать их использование в качестве пищевого и лекарственного сырья, а также сырья для биологически активных добавок.

Ключевые слова: полифенолы, бурые водоросли, Баренцево море, Белое море, море Баффина, Норвежское море, Атлантический океан, *Fucus vesiculosus*, *Fucus spiralis*, *Fucus serratus*, *Fucus evanescence*, *Ascophyllum nodosum*.

Работа выполнена в рамках Госзадания ММБИ РАН (базовое финансирование).

Введение

Исследования полифенолов бурых водорослей не теряют актуальности на протяжении последних 40 лет, а в настоящее время интерес к их изучению значительно возрос [1–3]. В первую очередь интерес в этой области обусловлен высокой биологической активностью полифенольных метаболитов водорослей, что делает их перспективным и ценным источником лекарств и компонентов функционального питания. Водорослевые полифенолы обладают различными фармакологическими свойствами, которые зависят от состава выделенных фракций, а также степени полимеризации молекул [1, 4, 5]. Согласно современным исследованиям полифенолы бурых водорослей проявляют антиоксидантное, антибактериальное и противовирусное действие, а также противоопухолевую и противораковую активность [1–3].

Полифенолы бурых водорослей преимущественно состоят из флоротанинов, которые представляют собой полимеры флороглюцина [1, 2]. Согласно исследованиям [2, 6] фукоиды по сравнению с другими представителями бурых водорослей характеризуются наибольшим содержанием полифенолов (до 12–18% от сухой массы водорослей). Известно, что накопление этих соединений зависит от факторов среды и зна-

Облучинская Екатерина Дмитриевна – кандидат фармацевтических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: okaterine@yandex.ru
Захарова Любовь Викторовна – стажер-исследователь, e-mail: pelyushoklyubov@mail.ru

чительно варьируется в зависимости от сезона сбора водорослей, уровня инсоляции, солености морской воды и от географического положения места их произрастания [1, 2, 6–8].

* Автор, с которым следует вести переписку.

Благоприятное время для сбора водорослей с целью получения полифенолов, по данным исследователей, различно для разных регионов. Исследования сезонных изменений содержания полифенолов водорослей, обитающих в районах Тронхеймсфьорда (Норвегия) [7, 8] и Аландских островов (Финляндия) [9], на примере бурых водорослей *Ascophyllum nodosum* и *Fucus vesiculosus* позволили выявить летний и зимний максимумы, которые коррелировали с репродуктивной стадией водорослей (фазой размножения). Для *F. vesiculosus* было показано, что зимние (январь–февраль) и летние (июль) максимумы зависят от степени прибойности мест обитания [9]. Бурые водоросли с побережья Шотландии [10] также содержали максимум полифенолов в летний период, а водоросли побережья Канады и Ирландии накапливали полифенолы осенью [8]. Проведенные исследования на Белом и Баренцевом море также показали, что большинство видов водорослей накапливают полифенолы в летне-осенний период [6, 11].

Перспективными районами добычи водорослевого сырья являются экологически чистые побережья морей Арктики, богатые запасами бурых водорослей. Бурые водоросли, а также некоторые виды красных имеют промысловое значение в морях Российской Федерации, их промысел ведется в настоящее время на Белом море, а также на Дальнем Востоке. Промысловыми объектами в Белом море являются два вида ламинариевых – *Saccharina latissima* и *Laminaria digitata*, их запасы по данным 2013 года оценены в 531 тыс. т, промысловые запасы фукоидов – около 143 тыс. т. Значительные запасы фукусовых водорослей сосредоточены в Баренцевом море и оцениваются в размере около 20 тыс. т [12].

К сожалению, Россия, обладающая огромными промысловыми запасами бурых водорослей, отстает от мировых производителей – Японии, США, Франции, Норвегии, Китая, где производство различных компонентов и препаратов из водорослей является важной отраслью экономики. Следует также отметить, что фукусовые водоросли являются лекарственным сырьем в европейских странах и в Китае, в то же время в России официально только ламинария [13]. Это также является сдерживающим фактором на пути создания лекарственных препаратов из фукусовых водорослей.

Проведение сравнительных исследований химического состава водорослевого сырья позволит выявить наиболее благоприятные для сбора регионы, выявить закономерности накопления различных биологически активных веществ (БАВ) и, следовательно, повысит качество целевых продуктов.

Потенциал применения бурых водорослей в качестве сырья для производства лекарственных препаратов огромен. Актуальной остается задача выявления периода сбора водорослей, а также акваторий с наиболее благоприятным комплексом факторов для накопления БАВ, включая полифенольные соединения.

Цель исследования – сравнительное исследование содержания полифенолов бурых водорослей, произрастающих на побережье морей Арктики и Северной Атлантики.

Экспериментальная часть

Объекты исследования: бурые водоросли *Fucus vesiculosus* Linnaeus 1753, *Fucus spiralis* Linnaeus 1753, *Fucus serratus* Linnaeus 1753, *Ascophyllum nodosum* Linnaeus 1863, *Fucus evanescence* C. Agargh 1820. Водоросли были собраны во время отлива в летний и осенний период 2019 г. соответственно в двух различных репродуктивных фазах – до и после сброса рецептакулов. Образцы каждого вида водорослей собраны на одной и той же глубине произрастания (0.6–1.0 м). Для исследования были отобраны образцы водорослей из восьми географических локаций в России, Норвегии, Гренландии и Исландии: Норвежское море, мыс Сюдсписсен (Ст. 1), залив Факсафлоуи моря Ирмингера (Ст. 2), Белое море, острова Кандалакшского залива (Ст. 3–6), Баренцево море, бухта Завалишина губы Териберская (Ст. 7), залив Диско моря Баффина (Ст. 8). Выбор районов исследования обусловлен транспортной доступностью, необходимой для организации добычи водорослей, а также возможностью организации экспедиционных работ. Районы исследований представлены на рисунке 1. В районах отбора образцов отсутствуют промышленные предприятия, видимое загрязнение мусором, нефтепродуктами. Антропогенная нагрузка на станциях Баренцева моря, Белого моря и моря Баффина практически отсутствует (Ст. 3–8), в некоторых районах развито активное судоходство (Ст. 1, 2), вблизи Ст. 1 и Ст. 2 находятся населенные пункты (г. Тромсё и г. Рейкьявик). В непосредственной близости от мест сбора образцов на Ст. 2 и Ст. 6 находятся открытые сероводородные геотермальные источники.

Образцы водорослей промывали на месте морской водой, талломы очищали от эпифитов, затем сушили в помещении при постоянной температуре 25 °С, влажности не более 45%. Воздушно-сухие талломы водорослей с остаточной влажностью 10±1% измельчали в порошок с помощью ножевого измельчителя (Redmond, Китай) до размера частиц не более 1–3 мм.

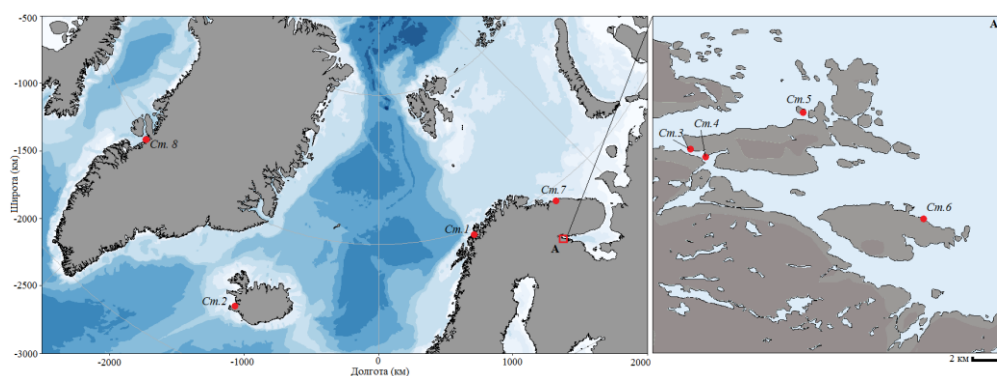


Рис. 1. Районы исследований

Определены репродуктивные фазы водорослей по наличию рецептакулов (органов размножения): все образцы водорослей, собранных в летний период, сохраняли зрелые рецептакулы. Осенние образцы не содержали рецептакулов. Одновременно с отбором образцов была определена соленость морской воды с помощью рефрактометра (Kelilong Co., Ltd, Китай) данные представлены в таблице 1.

Извлекали полифенолы 70% водным раствором ацетона: соотношение сырье : экстрагент 1 : 10, температура экстракции +4 °С, время настаивания 1 ч, 5-6-кратная ремацерация с перемешиванием. Многие авторы отмечают, что 70% водный раствор ацетона извлекает наибольшее количество полифенолов по сравнению с другими органическими растворителями [14–16]. Поэтому в данном исследовании была проведена серия экспериментов с 70% водным ацетоном. Из-за термолабильности полифенолов экстракция проводилась при 4 °С [17]. Кратность ремацерации установлена экспериментально по остаточному содержанию полифенолов после каждой ступени экстракции.

Содержание полифенолов в экстрактах водорослей определяли спектрофотометрически при 750 нм с использованием реагента Фолина-Чокальтеу согласно общепринятой методике [14, 18]. В качестве стандарта использовали флороглюцин (Sigma-Aldrich, Германия). Содержание полифенолов выражали в эквиваленте флороглюцина в процентах от абсолютно сухой массы водорослей (а.с.м.).

Статистическая обработка данных

Результаты 3 параллельных измерений были обработаны методами описательной статистики. Статистические данные рассчитаны с использованием STATISTICA (система программного обеспечения для анализа данных), версия 10, StatSoft, Inc. (2011).

Зависимость содержания полифенолов от солености оценивали с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена, уровень значимости $\alpha=0.05$.

Для анализа данных также использовали трехфакторный дисперсионный анализ (MANOVA) для оценки влияния фазы размножения, места обитания, солености на содержание полифенолов в водорослях, уровень значимости $\alpha=0.05$. Анализ проводился с использованием программного обеспечения NCSS и PASS, версия 5, Number Cruncher Statistical Systems (2005).

Таблица 1. Места сбора образцов водорослей

Страна	№ станции	Название акватории	Координаты	Соленость, ‰	
				лето	осень
Норвегия	1	Норвежское море, м. Сюдсписсен	69°37.63' N, 18°54.75' E	33	35
Исландия	2	Атлантический океан, з. Факсафлоуи	64°07.25' N, 21°55.84' W	30	35
	3	Белое море, з. Кандакашский, – о. Большой Горелый	66°18.82' N, 33°36.76' E	23	–
	4	– о. Матренин	66°18.57' N, 33°37.92' E	15	–
Россия	5	– о. Малый Андронин	66°20.00' N, 33°46.01' E	26	–
	6	– о. Пижостров	66°16.39' N, 33°56.06' E	22	–
Гренландия	7	Баренцево море, б. Завалишина	69°11.02' N, 35°14.73' E	20–25	17–25
	8	Море Баффины, з. Диско	69°13.19' N, 51°06.70' W	27	–

Результаты и обсуждение

В настоящее время рядом авторов опубликованы данные о влиянии на содержание полифенолов видовой принадлежности водорослей, места их произрастания, а также сезона сбора [1, 2, 6–11]. Для макроводорослей существуют такие фенологические циклы, которые оказывают влияние на физиологические и фитохимические показатели организма. Неблагоприятные, или же, наоборот, благоприятные, факторы среды обитания, а также климатические условия оказывают влияние на физиологические процессы макрофитов, и изменение содержания полифенолов в течение года может коррелировать с репродуктивной стадией водорослей [8]. Данные многолетних исследований водорослей Дальнего Востока [1, 19] свидетельствуют об адаптационных изменениях содержания основных минеральных и биологически активных веществ для каждого места обитания. В результате сравнительного исследования разных районов дальневосточного побережья выявлены закономерности аккумуляции органических веществ, характерные для данного региона [19]. Для акваторий, расположенных в арктической зоне и Северной Атлантике, показано, что максимумы содержания полифенолов имели место в январе, феврале, сентябре и декабре [7, 9, 11]. Летний максимум был обнаружен в июне в исследовании содержания полифенолов *F. vesiculosus* и *A. nodosum* [7] и в июле [8]. Кроме того, по данным Ragan и Jensen, для водорослей, обитающих в акваториях Норвегии [7], содержание полифенолов было максимально только в период с апреля по май, аналогично с исследованием ряда акваторий Баренцева моря в России. Различные факторы должны быть приняты во внимание для возможного объяснения наблюдаемых закономерностей.

В данном исследовании рассмотрены такие факторы, как место обитания, вид водорослей, фаза размножения, соленость, оказывающие влияние на накопление полифенолов водорослями арктических и северо-западных атлантических акваторий. Изучение водорослей на Баренцевом, Белом, а также Норвежском море показали, что развитие органов размножения (рецептакулов) начинается в апреле-мае, созревание рецептакулов оканчивается в июле-августе, сброс – в августе – начале сентября [7–10, 20].

Концентрация полифенолов в бурых водорослях обычно определяется с использованием реагента Фолина-Чокальтеу или Фолина-Дениса и было показано, что данный метод позволяет получить адекватное представление об общем количестве этих соединений, особенно при оценке пригодности водорослевого сырья для их извлечения [18].

В результате исследования были получены данные об общем содержании полифенолов в водорослях вида *F. vesiculosus*, собранных летом до сброса и осенью после сброса зрелых рецептакулов в 7 точках, которые расположены в Норвежском, Белом, Баренцевом морях, а также на западном побережье Исландии (море Ирмингера), которые представлены на рисунке 2.

В зависимости от места сбора водорослей были выявлены существенные отличия в содержании полифенолов при условии, что была соблюдена одинаковая методика отбора и подготовки проб, а также репродуктивное состояние водорослей и условия экстракции. Наибольшее содержание полифенолов обнаружено в водорослях Баренцева моря, бухты Завалишина (14.4% от сухой массы водорослей), на острове Большой Горелый в Белом море (13.3%), а также в водорослях Норвежского моря (мыс Сюдсписсен) (11.6%) в летний период, что согласуется с данными других авторов. Так, в работе [11] показано высокое содержание полифенолов в водорослях вида *F. vesiculosus* (15.4–18.6%) и *A. nodosum* (14.6–14.8%), произрастающих в Белом и Баренцевом морях. Норвежскими исследователями [7] также сделан вывод о высоком содержании полифенолов у *A. nodosum* и *F. vesiculosus*, собранных на побережье Тронхеймс-фьорда (11–14%). Примечательно, что наименьшее содержание полифенолов было обнаружено нами в водорослях залива Факсафлоуи (море Ирмингера) (1.4%), а также в Белом море на острове Пешостров (7.9%). Исследуемые локации имеют общий характерный абиотический фактор – выход сероводорода на поверхность, в заливе Факсафлоуи водоросли были собраны в непосредственной близости от термального источника. Во время прилива морская вода смешивается с более теплой и менее соленой водой геотермальной ванны, и водоросли полностью в нее погружаются до следующего отлива. Полученные данные уникальны, поскольку нами не найдено в литературных источниках других упоминаний влияния сероводорода на уровень содержания полифенольных соединений у бурых водорослей.

При исследовании различий в содержании полифенолов других исследуемых водорослей с учетом репродуктивного периода сбора макрофитов были получены данные, представленные на рисунках 3–5.

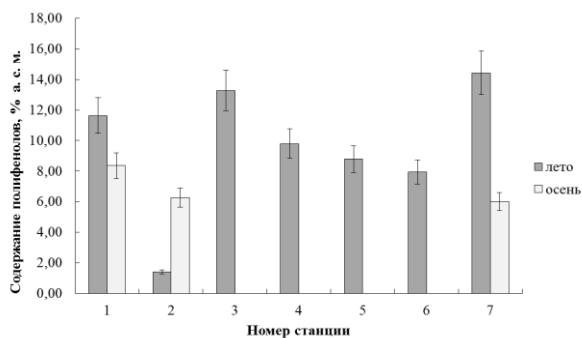


Рис. 2. Содержание полифенолов в *F. vesiculosus* летом 2019 г.

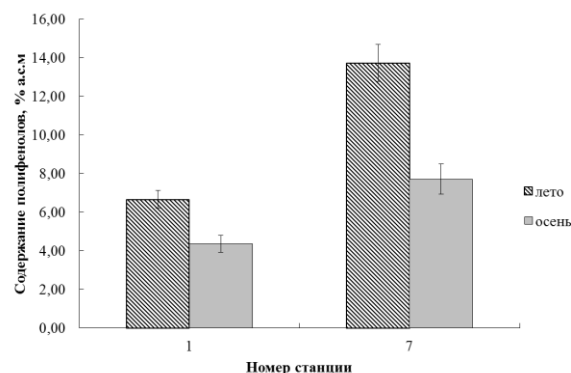


Рис. 3. Содержание полифенолов в *F. serratus* летом и осенью 2019 г.

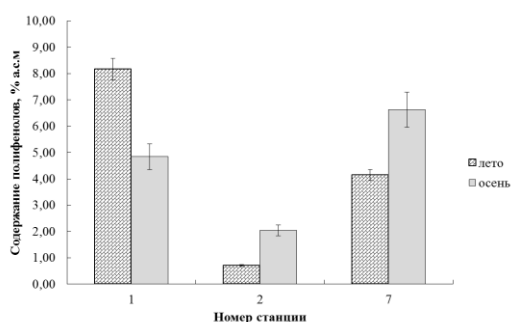


Рис. 4. Содержание полифенолов в *F. spiralis* летом и осенью 2019 г.

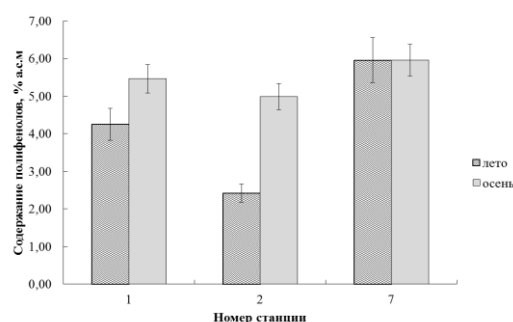


Рис. 5. Содержание полифенолов в *A. nodosum* летом и осенью 2019 г.

Обозначения на рисунках: 1 – Норвежское море, м. Сюдсписсен, 2 – Атлантический океан, з. Факсафлоуи, 3 – Белое море, о. Большой Горелый, 4 – Белое море, о. Матренин, 5 – Белое море, о. Малый Андронин, 6 – Белое море, о. Пешостров, 7 – Баренцево море, б. Завалишина

Динамика уровня содержания полифенолов водорослей, по данным ранее проведенных исследований, могли быть вызваны различными условиями в местах сбора [6–11]. В течение года фукусковые водоросли проходят через разные фазы роста и развития. Репродуктивная фаза может длиться с апреля по июнь, а в конце июня – августе зрелые рецептакулы сбрасываются, в сентябре рост водорослей замедляется. Некоторые авторы связывают изменения содержания полифенолов в течение года с репродуктивной стадией водорослей [7–9]. Так, показано, что содержание полифенолов на протяжении всей фазы фертильности (с апреля по июнь) ниже, а максимум достигается в период сброса рецептакулов.

При исследовании изменений содержания полифенолов в *F. vesiculosus*, собранных в трех акваториях, в летний и осенний период нами не выявлено единой тенденции для всех локаций. По данным нашего исследования, в летний период у фертильных *F. vesiculosus* наблюдалось увеличение содержания полифенолов (до 12–14%) в акваториях Норвежского и Баренцева моря (Ст. 1 и Ст. 7), а в осенний период – существенное снижение значений до 6–8%. Однако в водорослях, собранных в заливе Факсафлоуи (Ст. 2), наблюдалась обратная тенденция – летом содержание полифенолов были минимально (1.4%), а к осени возросло до 6.3%. Данная тенденция также выявлена у других видов – *F. spiralis* (рис. 4) и *A. nodosum* (рис. 5) – в этой локации. Для образцов *F. serratus* характерна та же тенденция сезонной изменчивости содержания полифенолов, что и для *F. vesiculosus* на Ст. 1 и Ст. 7 (рис. 3). В данном случае содержание полифенолов летом было в диапазоне 7–14%, а осенью снизилось до 4–6%. Для *F. spiralis* на Ст. 1 наибольшее значение содержания полифенолов было летом (8.2%) и почти в 2 раза снизилось осенью (4.8%), однако для образцов со Ст. 2 и Ст. 7 выявлена обратная тенденция.

Для *A. nodosum* в трех локациях обнаружена общая тенденция: летом содержание полифенолов ниже (2.4–5.5%), чем осенью (5.0–6.0%), однако на Ст. 7 содержание полифенолов в исследуемые периоды не изменялась.

Также было отмечено, что большую роль играет место обитания водорослей на уровень содержания в них полифенолов. Так, для некоторых видов (*F. vesiculosus*, *F. serratus*, *F. spiralis*) в пределах одной локации (Ст. 1) была обнаружена схожая тенденция сезонной изменчивости – содержание полифенолов летом выше, чем осенью, однако на Ст. 2 у видов *F. vesiculosus*, *F. spiralis*, *A. nodosum* выявлена обратная тенденция.

В заливе Диско моря Баффина (западное побережье Гренландии) на Ст. 8 были собраны образцы *F. evanesens*, который также произрастает и на Ст. 6 в Белом море. Сбор образцов этого вида водорослей производился одновременно в летний сезон 2019 г. В образцах водорослей с гренландского побережья было выявлено очень низкое содержание полифенолов (0.8%), однако в образцах из Белого моря содержание полифенолов значительно выше (11.9%).

Ряд исследований обращают внимание на сезонную изменчивость в накоплении полифенольных соединений водорослями. Авторы исследования [7] отметили, что максимальное количество этих вторичных метаболитов у *A. nodosum* и *F. vesiculosus*, собранных на побережье Тронхеймс-фьорда (Норвегия) наблюдалось в зимний период (11–14%), тогда как в апреле-мае снижалось до 8–10%. Содержание полифенолов в *F. vesiculosus* и *A. nodosum*, собранных в Канаде (Залив св. Лаврентия), содержали значительно меньшее количество полифенолов (менее 0.2%) [21], максимальное их содержание отмечено в осенний период. В другом исследовании [22] содержание полифенолов в *F. vesiculosus*, произрастающих в Северном море, пролив Каттегат (Дания), составляло 1% в пересчете на сухое сырье. Другой вид бурых водорослей *Eisenia bicyclis*, произрастающие в Японском море (Корея) [23], также характеризуются невысоким содержанием полифенолов 0.6–2%. Однако водоросли класса *Phaeophyceae* в целом накапливают более высокое содержание полифенолов, по сравнению с красными (*Rhodophyta*) и зелеными водорослями (*Chlorophyta*) [1–3].

Анализ полученных данных позволяет предположить, что сезонная изменчивость содержания полифенолов не регулируется исключительно фазами жизненного цикла водорослей. Это особенно очевидно при сравнении содержания полифенолов из образцов водорослей, собранных в географически близко расположенных локациях одновременно и анализируемых по одной методике [7–11]. Это еще раз подтверждает гипотезу о том, что места произрастания водорослей с индивидуальными абиотическими характеристиками среды являются определяющими факторами в синтезе полифенолов.

Многие исследователи отмечают соленость морской воды одним из важных факторов, влияющих на накопление полифенолов водорослями [1–3, 8, 11]. В нашем исследовании значимой корреляции с соленостью содержания полифенолов не выявлено (уровень значимости p более 0.05), хотя коэффициент ранговой корреляции Спирмена имел высокие значения (0.8–0.9).

Для оценки влияния основных факторов (место сбора, вид водорослей, фаза размножения) на накопление полифенолов в трех видах фукусковых водорослей (*F. vesiculosus*, *F. spiralis*, *A. nodosum*) был проведен многофакторный дисперсионный анализ, результаты которого показаны в таблице 2.

По результатам дисперсионного анализа MANOVA, все перечисленные факторы и их взаимодействия являются значимыми. Фактором, наиболее значимо влияющим на содержание полифенолов, является место сбора водорослей, меньше всего оказывает воздействие фаза размножения, однако совокупность этих двух факторов наиболее значима из всех взаимодействий. Место произрастания водорослей естественным образом является важнейшим фактором, определяющим физиологические и биохимические процессы в макроводорослях, поскольку именно в данных условиях среды растения формируют свой иммунитет, защитные функции от временных и постоянных воздействий различных факторов (солености, освещенности, антропогенной нагрузки и т.д.), приспосабливаются к определенному комплексу всех факторов своей среды обитания [24].

Таблица 2. Результаты трехфакторного дисперсионного анализа содержания полифенолов бурых водорослей (*F. vesiculosus*, *F. spiralis*, *A. nodosum*), собранных летом и осенью на Ст. 1, 2, 7

Факторы	F-ratio	p-value	Power (Alpha=0.05)
Место сбора	1256.98	<0.0001	1.0000
Вид	900.11	<0.0001	1.0000
Фаза размножения	17.22	0.0002	0.9811
Взаимодействие факторов			
Место сбора * Вид	155.11	<0.0001	1.0000
Место сбора * Фаза размножения	415.98	<0.0001	1.0000
Вид * Фаза размножения	169.59	<0.0001	1.0000
Место сбора * Вид * Фаза размножения	289.45	<0.0001	1.0000

Заключение

При сравнении фукоидов акваторий Арктики и Северной Атлантики по общему содержанию полифенолов было установлено, что минимальные значения характерны для *F. spiralis* и *F. vesiculosus*, произрастающих на западном побережье Исландии (з. Факсафлоуи, море Ирмингера), а наибольшие значения найдены для *F. vesiculosus* в б. Завалишина Баренцева моря (Россия). Исследовано влияние основных факторов (место сбора, вид водорослей, фаза размножения) с помощью трехфакторного дисперсионного анализа MANOVA на общее содержание фенолов в водорослях (*F. vesiculosus*, *F. spiralis*, *A. nodosum*), собранных летом и осенью. Результаты анализа показали, что наибольшее влияние оказывает место обитания водорослей, которое отражает комплекс абиотических факторов акватории. Фаза размножения оказалась наименее значимым фактором для всех исследуемых видов фукоидов. Накопление полифенолов зависит от вида водорослей и места их обитания. По данным исследования для *F. spiralis* и *F. serratus* в летний период содержание полифенолов было выше, чем осенью, а для *A. nodosum* тенденция была обратной. Для *F. spiralis*, *F. vesiculosus* и *A. nodosum*, произрастающих на западном побережье Исландии, осенью содержание полифенолов было выше, чем летом. Для *F. vesiculosus* и *F. serratus* из б. Завалишина Баренцева моря наибольшее значение отмечено в летний период, наименьшее – в осенний период. Для *F. spiralis* наблюдалась обратная тенденция, а для *A. nodosum* содержание полифенолов не изменялось в исследуемый период.

Значительные отличия по содержанию полифенолов выявлены при сравнении образцов, собранных в разных районах Арктики и Северной Атлантики (Россия, Норвегия, Исландия и Гренландия), и связаны с географическими и местными природными условиями. Высокое содержание полифенолов в изученных нами видах водорослей позволяет предполагать возможность использования их в качестве пищевого и фармацевтического сырья, а также сырья для биологически активных добавок.

Список литературы

1. Имбс Т.И., Звягинцева Т.Н. Флоротаннины – полифенольные метаболиты бурых водорослей // Биол. моря. 2018. Т. 44. №4. С. 217–227. DOI: 10.1134/S0134347518040010.
2. Боголицын К.Г., Дружинина А.С., Овчинников Д.В., Каплицин П.А., Шульгина Е.В., Паршина А.Э. Полифенолы бурых водорослей // Химия растительного сырья. 2018. №3. С. 5–21. DOI: 10.14258/jcprm.2018031898.
3. Li Y.X., Wijesekara I., Li Y., Kim S.-K. Phlorotannins as bioactive agents from brown algae // Process biochemistry. 2011. Vol. 46. N12. Pp. 2219–2224. DOI:10.1016/j.procbio.2011.09.015.
4. Боголицын К.Г., Дружинина А.С., Овчинников Д.В., Паршина А.Э., Шульгина Е.В., Турова П.Н., Ставрианиди А.Н. Полифенолы арктических бурых водорослей: выделение, полимолекулярный состав // Химия растительного сырья. 2019. №4. С. 65–75. DOI: 10.14258/jcprm.2019045135.
5. Wang T., Jónsdóttir R., Liu H., Gu L., Kristinsson H.G., Raghavan S., Olafsdóttir G. Antioxidant capacities of phlorotannins extracted from the brown algae *Fucus vesiculosus* // Agricultural and food chemistry. 2012. Vol. 60. Pp. 5874–5883. DOI: 10.1021/jf3003653.
6. Клиндух М.П., Облучинская Е.Д. Сравнительное исследование химического состава бурых водорослей *Fucus vesiculosus* и *Ascophyllum nodosum* // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, вып. 3. С. 466–471.
7. Ragan M.A., Jensen A. Quantitative studies on brown algal phenols. II Seasonal variation in polyphenol content of *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. and *Fucus vesiculosus* // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 1978. Vol. 34. Pp. 245–258. DOI: 10.1016/S0022-0981(78)80006-9.
8. Parys S., Kehraus S., Pete R., Kupper F.C., Glombitza K.W., König G.M. Seasonal variation of polyphenolics in *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae) // European Journal of Phycology. 2009. Vol. 44. N3. Pp. 331–338. DOI: 10.1080/09670260802578542.
9. Ronnberg O., Ruokolaihti C. Seasonal variations algal epiphytes and phenolic content of *Fucus vesiculosus* in a northern Baltic archipelago // Ann. Bot. Fennici. 1986. Vol. 23. Pp. 317–323.
10. Svensson C.J., Pavia H., Toth G.B. Do plant density, nutrient availability, and herbivore grazing interact to affect phlorotannin plasticity in the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* // Mar. Biol. 2007. Vol. 151. Pp. 2177–2188. DOI: 10.1007/s00227-007-0649-5.
11. Ткач А.В., Облучинская Е.Д. Стерины и полифенолы фукоидов мурманского побережья Баренцева моря // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 20. №2. С. 326–335. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-2-326-335
12. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2013 году» URL: http://www.ecogodoklad.ru/2013/wwwBio1_4_5.aspx
13. Shikov A.N., Tsitsilin A.N., Pozharitskaya O.N., Makarov V.G., Heinrich M. Traditional and Current Food Use of Wild Plants Listed in the Russian Pharmacopoeia // Frontiers in Pharmacology. 2017. Vol. 8. Article 841. DOI: 10.3389/fphar.2017.00841.

14. Van Alstyne K.L. A comparison of three methods for quantifying brown algal polyphenolic compounds // *Journal of Chemical Ecology*. 1995. Vol. 21. Pp. 45–58. DOI: 10.1007/BF02033661.
15. Koivikko R., Loponen J., Pihlaja K., Jormalainen V. High-performance liquid chromatographic analysis of phlorotannins from the brown alga *Fucus vesiculosus* // *Phytochemical Analysis*. 2007. Vol. 18. Pp. 326–332. DOI: 10.1002/pca.986
16. Holdt S.L., Kraan S. Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. Optimization of Phlorotannins Extraction from *Fucus vesiculosus* // *J. Appl. Phycol.* 2011. Vol. 23. Pp. 543–597. DOI: 10.1007/s10811-010-9632-5.
17. Moreira R., Chenlo F., Sineiro J., Arufe S., Sexto S. Drying temperature effect on powder physical properties and aqueous extract characteristics of *Fucus vesiculosus* // *J. Appl. Phycol.* 2016. Vol. 28. Pp. 2485–2494. DOI: 10.1007/s10811-015-0744-9.
18. Ford L., Theodoridou K., Sheldrake G.N., Walsh P.J. A critical review of analytical methods used for the chemical characterisation and quantification of phlorotannin compounds in brown seaweeds // *Phytochemical Analysis*. 2019. Vol. 30. N6. Pp. 587–599. DOI: 10.3390/antiox8120612.
19. Аминина Н.М. Сравнительная характеристика бурых водорослей прибрежной зоны Дальнего Востока // *Известия ТИНРО*. 2015. Т. 182. С. 258–268. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-182-258-268.
20. Шошина Е.В., Капков В.И. Экологические особенности промысловых фукусовых водорослей Мурманского побережья Баренцева моря // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2014. Т. 17. №1. С. 180–189.
21. Kyung-Tae K. Seasonal variation of seaweed components and novel biological function of fucoidan extracted from brown algae in Quebec: diss. ...PhD. Quebec, 2012. 142 p.
22. Farvin K.H.S., Jacobsen C. Phenolic compounds and antioxidant activities of selected species of seaweeds from Danish coast // *Food Chemistry*. 2013. Vol. 138. Pp. 1670–1681. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.10.078.
23. Kim S.M., Kang S.W., Jeon J.-S., Jung Y.-J., Kim W.-R., Kim C.Y., Um B.-H. Determination of major phlorotannins in *Eisenia bicyclis* using hydrophilic interaction chromatography: Seasonal variation and extraction characteristics // *Food Chemistry*. 2013. Vol. 138. Pp. 2399–2406. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.11.057.
24. Шибнева С.Ю., Скрипцова А.В. Внутривидовая морфологическая изменчивость морских макрофитов и факторы, ее обуславливающие // *Биология моря*. 2015. Т. 41. №5. С. 301–311.

Поступила в редакцию 13 мая 2020 г.

После переработки 19 июня 2020 г.

Принята к публикации 21 июня 2020 г.

Для цитирования: Облучинская Е.Д., Захарова Л.В. Сравнительное исследование полифенолов бурых водорослей морей Арктики и Северной Атлантики // *Химия растительного сырья*. 2020. №4. С. 129–137. DOI: 10.14258/jcprm.2020047755.

*Obluchinskaya E.D.**, *Zakharova L.V.* COMPARATIVE STUDY OF POLYPHENOLS OF BROWN ALGAE OF THE BARENTS SEA AND THE WHITE SEA, AS WELL AS THE WATERS OF THE NORTH ATLANTIC

*Murmansk Marine Biological Institute RAS, ul. Vladimirskaia, 17, Murmansk, 183010 (Russia),
e-mail: okaterine@yandex.ru*

The polyphenol content in the brown algae of the Barents, White Seas, as well as the water areas of the Northwest Atlantic (the Norwegian Sea, the Faxflow bay of the Atlantic Ocean) located in Russia, Norway, Greenland, and Iceland are compared. Algae of the following species were used for this study: *Fucus vesiculosus*, *Fucus spiralis*, *Fucus serratus*, *Ascophyllum nodosum*, *Fucus evanescens*. It was found that the most productive raw materials for the extraction of polyphenolic compounds are brown algae *F. vesiculosus*, growing in Zavalishin Bay of the Barents Sea (Russia): the highest polyphenol content (14.4%) in the summer of 2019 was noted here. Polyphenols detected in *F. vesiculosus* in the summer from the White Sea on about. Great burnt (13.3%) (Russia), as well as in the Norwegian Sea, Cape Sydspissen (11.6%) (Norway). The minimum content of polyphenols was found in *F. spiralis* (0.7% dry mass) on the coast of Iceland (Faxflow bay), a low content of polyphenols was characteristic of all types of algae from this location (0.7–2.4%). Three-way analysis of variance (MANOVA) on the example of three types of algae (*F. vesiculosus*, *F. spiralis*, *A. nodosum*) showed that all the studied factors (place of collection, type of algae, fertile phase) are significant. The most significant factor affecting the accumulation of polyphenols by brown algae is the location of algae growth.

The high content of polyphenols in the types of algae we studied from Russian water areas allows us to recommend their use as food and medicinal raw materials, as well as raw materials for biologically active additives.

Keywords: polyphenols, brown algae, Barents Sea, White Sea, Baffin Sea, Norwegian Sea, Atlantic Ocean, *Fucus vesiculosus*, *Fucus spiralis*, *Fucus serratus*, *Fucus evanescence*, *Ascophyllum nodosum*.

* Corresponding author.

References

1. Imbs T.I., Zvyagintseva T.N. *Biologiya moray*, 2018, vol. 44, no. 4, pp. 217–227. DOI: 10.1134/S0134347518040010. (in Russ.).
2. Bogolitsyn K.G., Druzhinina A.S., Ovchinnikov D.V., Kaplitsin P.A., Shul'gina Ye.V., Parshina A.E. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 3, pp. 5–21. DOI: 10.14258/jcprm.2018031898. (in Russ.).
3. Li Y.X., Wijesekara I., Li Y., Kim S.-K. *Process biochemistry*, 2011, vol. 46, no. 12, pp. 2219–2224. DOI:10.1016/j.procbio.2011.09.015.
4. Bogolitsyn K.G., Druzhinina A.S., Ovchinnikov D.V., Parshina A.E., Shul'gina Ye.V., Turova P.N., Stavrianidi A.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2019, no. 4, pp. 65–75. DOI: 10.14258/jcprm.2019045135. (in Russ.).
5. Wang T., Jónsdóttir R., Liu H., Gu L., Kristinsson H.G., Raghavan S., Olafsdóttir G. *Agricultural and food chemistry*, 2012, vol. 60, pp. 5874–5883. DOI: 10.1021/jf3003653.
6. Klindukh M.P., Obluchinskaya E.D. *Vestnik MGTU*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 466–471. (in Russ.).
7. Ragan M.A., Jensen A. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1978, vol. 34, pp. 245–258. DOI: 10.1016/S0022-0981(78)80006-9.
8. Parys S., Kehraus S., Pete R., Kupper F.C., Glombitza K.W., König G.M. *European Journal of Phycology*, 2009, vol. 44, no. 3, pp. 331–338. DOI: 10.1080/09670260802578542.
9. Ronnberg O., Ruokolahti C. *Ann. Bot. Fennici*, 1986, vol. 23, pp. 317–323.
10. Svensson C.J., Pavia H., Toth G.B. *Mar. Biol.*, 2007, vol. 151, pp. 2177–2188. DOI: 10.1007/s00227-007-0649-5.
11. Tkach A.V., Obluchinskaya Ye.D. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 326–335. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-2-326-335(in Russ.).
12. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2013 godu»* [State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2013"] URL: http://www.ecogosdoklad.ru/2013/wwwBio1_4_5.aspx (in Russ.).
13. Shikov A.N., Tsitsilin A.N., Pozharitskaya O.N., Makarov V.G., Heinrich M. *Frontiers in Pharmacology*, 2017, vol. 8, article 841. DOI: 10.3389/fphar.2017.00841.
14. Van Alstyne K.L. *Journal of Chemical Ecology*, 1995, vol. 21, pp. 45–58. DOI: 10.1007/BF02033661.
15. Koivikko R., Loponen J., Pihlaja K., Jormalainen V. *Phytochemical Analysis*, 2007, vol. 18, pp. 326–332. DOI: 10.1002/pca.986
16. Holdt S.L., Kraan S. *J. Appl. Phycol.*, 2011, vol. 23, pp. 543–597. DOI: 10.1007/s10811-010-9632-5.
17. Moreira R., Chenlo F., Sineiro J., Arufe S., Sexto S. *Appl. Phycol.*, 2016, vol. 28, pp. 2485–2494. DOI: 10.1007/s10811-015-0744-9.
18. Ford L., Theodoridou K., Sheldrake G.N., Walsh P.J. *Phytochemical Analysis*, 2019, vol. 30, no. 6, pp. 587–599. DOI: 10.3390/antiox8120612.
19. Aminina N.M. *Izvestiya TINRO*, 2015, vol. 182, pp. 258–268. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-182-258-268. (in Russ.).
20. Shoshina E.V., Kapkov V.I. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 180–189. (in Russ.).
21. Kyung-Tae K. *Seasonal variation of seaweed components and novel biological function of fucoidan extracted from brown algae in Quebec: diss. ...PhD*. Quebec, 2012, 142 p.
22. Farvin K.H.S., Jacobsen C. *Food Chemistry*, 2013, vol. 138, pp. 1670–1681. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.10.078.
23. Kim S.M., Kang S.W., Jeon J.-S., Jung Y.-J., Kim W.-R., Kim C.Y., Um B.-H. *Food Chemistry*, 2013, vol. 138, pp. 2399–2406. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.11.057.
24. Shibneva S.Yu., Skriptsova A.V. *Biologiya moray*, 2015, vol. 41, no. 5, pp. 301–311. (in Russ.).

Received May 13, 2020

Revised June 19, 2020

Accepted June 21, 2020

For citing: Obluchinskaya E.D., Zakharova L.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 129–137. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020047755.

