

УДК 574.5+(581.19: 547.9+543.42)

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО МЕТАБОЛОМА И АНТИОКСИДАНТНАЯ АКТИВНОСТЬ *POTAMOGETON PERFOLIATUS* L. (POTAMOGETONACEAE), ПРОИЗРАСТАЮЩЕГО В АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ*

© Ю.В. Крылова^{1,2}, О.В. Новиченко³, Е.А. Курашов^{2**}

¹ Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГОСНИОРХ») им. Л.С. Берга), наб. Макарова, 26, Санкт-Петербурга, 199053 (Россия)

² Институт озераведения РАН, обособленного подразделения СПб ФИЦ РАН, ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербурга, 196105 (Россия), e-mail: evgeny_kurashov@mail.ru

³ Астраханский государственный университет, ул. Татищева, 20А, Астрахань, 414056 (Россия)

Впервые исследован компонентный состав низкомолекулярного метаболома рдеста пронзеннолистного (*Potamogeton perfoliatus* L., сем. Potamogetonaceae), произрастающего в Астраханской области (култучная зона р. Волги). Низкомолекулярные органические соединения (НОС) в составе эфирного масла получали из высушенных растений методом паровой гидродистилляции с использованием аппарата Клевенджера. Качественный и количественный состав НОС был исследован при помощи газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ/МС комплекс TRACE ISQ (Thermo Scientific) с квадрупольным масс-анализатором). В составе низкомолекулярного метаболома *P. perfoliatus* выявлено 164 компонента, из которых было идентифицировано 151 соединение. Мажорными НОС были карбоновые кислоты – тетрадекановая (69.7%) и гексадекановая (10.1%), а также фитол (3.4%) и фитон (1.4%), характеризующиеся разноплановой биологической активностью. Исследована также антиоксидантная активность водно-спиртового экстракта *P. perfoliatus* фотометрическим методом, основанном на реакции ДФПГ (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил), растворенного в этаноле, с образцом антиоксиданта. Показано, что экстракт *P. perfoliatus* обладает более выраженными антиоксидантными свойствами, чем протестированные лекарственные препараты (аскорбиновая кислота и эмоксипин). *P. perfoliatus* из култушной зоны р. Волги может рассматриваться как природный возобновляемый ресурс для получения сырья для создания эффективных композиций альгицидов нового поколения для борьбы с цианобактериальным «цветением», а также для получения ценных природных форм НОС растительного происхождения для различных типов применения в фармакологии, медицине, косметологии, пищевой промышленности и других отраслях.

Ключевые слова: рдест пронзеннолистный, *Potamogeton perfoliatus* L., низкомолекулярные органические соединения, газовая хромато-масс-спектрометрия, эфирное масло, компонентный состав, антиоксидантная активность, река Волга.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – ФИЦ РАН по теме 0154-2019-0002. Авторы благодарны за техническую поддержку исследования Ресурсному центру «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ.

Введение

К настоящему времени накоплен значительный материал по видовому составу и распространению водной растительности в дельте Волги [1, 2], однако явно недостаточно сведений и исследований по потенциалу ее практического использования.

Авандельта и култучная зона дельты Волги являются обширным мелководным пространством,

Окончание на С. 144.

* Данная статья имеет электронный дополнительный материал (приложение), который доступен читателям на сайте журнала. DOI: 10.14258/jcprm.20220411179s

** Автор, с которым следует вести переписку.

обильно зарастающим летом водной и прибрежно-водной растительностью. Среди высших водных растений широкое распространение получили рдесты, которые хорошо представлены во флоре Астраханской области. Наиболее массовыми видами семейства Potamogetonaceae в Астраханской обл. являются: рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.), рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.), рдест курчавый (*Potamogeton crispus* L.), рдест узловатый (*Potamogeton nodosus* Poir.) и рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L.). Среди этого рода встречаются виды как с плавающими, так и с полностью погруженными листьями [3].

Рдест пронзеннолистный (*P. perfoliatus*) относится к многолетним водным растениям. Произрастает по всей территории России, за исключением арктических и пустынных районов. Может рассматриваться как космополит. Цветет и плодоносит, как правило, в июле – августе. Подробное описание вида представлено в [4].

В настоящее время все большую актуальность приобретают исследования по поиску и внедрению в практику препаратов из растительного сырья. Благодаря их биологическому происхождению, эти препараты характеризуются высоким химическим разнообразием и лучшими показателями соотношения АРМЭ/ТОКС (абсорбция, распределение, метаболизм и экскреция / токсичность). Эти преимущества, важность, эффективность и перспективы использования растительных продуктов в медицине в качестве противомикробных средств, а также в составе комплексной терапии, в частности, были подробно описаны еще в 1999 г. [5].

Водные растения содержат такие природные антиоксиданты, как фенольные соединения, пигментные вещества (антоцианы, хлорофиллы, каротиноиды), витамины и др. [6]. Известно, что выраженной антиоксидантной активностью (АОА) обладает природное соединение морской пектин – зостерин из морской травы *Zostera marina* L. [7]. Антиоксиданты играют важную роль в регуляции протекания свободно-радикальных превращений в организме, значительно влияют на его состояние, вследствие чего антиоксиданты и исследование антиокислительных свойств соединений в последнее время являются весьма актуальными.

Имеются исследования о содержании в составе высших водных растений Волго-Каспийского региона разного рода соединений: клетчатки, протеинов, липидов, углеводов и др. [8, 9], однако низкомолекулярный метаболит (НМ) рдеста пронзеннолистного (*P. perfoliatus*) из этого региона изучен еще не был. Не проводились исследования и по определению АОА экстракта *P. perfoliatus*.

Цель данной работы – изучение компонентного состава низкомолекулярных органических соединений (НОС) в составе эфирного масла *P. perfoliatus*, произрастающего в Астраханской области, и определение АОА экстракта рдеста пронзеннолистного.

Экспериментальная часть

Сбор *P. perfoliatus* был проведен в култушной зоне реки Волги на затишном прибрежном участке (Володарский район, Астраханская обл., 46°05'16.3"N, 47°53'36.6"E) в фазе цветения.

Растения были изъяты из воды и промыты. Очистку стеблей и листьев осуществляли в соответствии с [10]. Стебли и листья рдеста были освобождены вручную от обрастаний и загрязнений.

Растения сушили в естественных условиях до воздушно-сухого состояния без доступа прямых лучей солнца. Высушенные растения были доставлены в лабораторию для дальнейших исследований. Воздушно-сухие растения хранились в лаборатории при относительной влажности 75%.

Компонентный состав НМ рдеста пронзеннолистного исследовали в составе эфирного масла, полученного из воздушно-сухого растительного материала методом паровой гидродистилляции. Эфирное масло, содержащее НОС, из высушенных растений (масса воздушно-сухого образца составляла 15 г) выделяли, используя аппарат Клевенджера [11]. Перед перегонкой растительный материал измельчали до порошкообразного состояния в блендере. Использовали несколько высушенных растений, чтобы получить инте-

гральный порошкообразный образец, из которого потом была взята необходимая навеска. Полученный дистиллят экстрагировали гексаном. Экстракт до хромато-масс-спектрометрического анализа сохраняли в морозильной камере при T=-18 °C.

Состав НОС изученного вида макрофита выявляли в гексановых экстрактах на хромато-масс-

Новиченко Ольга Викторовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории биотехнологий, доцент кафедры биотехнологии, зоологии и аквакультуры, e-mail: ollevi@bk.ru
Курашов Евгений Александрович – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией гидробиологии, профессор кафедры экологической безопасности и устойчивого развития регионов, e-mail: evgeny_kurashov@mail.ru

спектрометрическом комплексе TRACE ISQ (Thermo Scientific) с квадрупольным масс-анализатором. Использовали колонку модели «TRACE TR-5MS GC Column, 15m, 0.25mmID, 0.25µm Film». Газом-носителем служил гелий. Масс-спектры снимали в режиме сканирования по полному диапазону масс (30–600 m/z) в программированном режиме температур (35 °C – 3 мин, 2 °C/мин до 60 °C – 3 мин, 2 °C/мин до 80 °C – 3 мин, 4 °C/мин до 120 °C – 3 мин, 5 °C/мин до 150 °C – 3 мин, 15 °C/мин до 240 °C – 10 мин) с последующей пошаговой обработкой хроматограмм. Идентификацию выявленных НОС проводили с использованием библиотек масс-спектров «NIST-2014» и «Wiley». Для более точной идентификации применяли линейные индексы удерживания [12], полученные с использованием стандартов алканов C_7 – C_{30} . Количественный анализ выполняли с использованием бензофенона в качестве внутреннего стандарта.

Сходство компонентного состава НОС эфирного масла *P. perfoliatus* из реки Волги сравнили с таким этого же вида из Свирской губы Ладожского озера [13], используя коэффициенты сходства Жаккара (J) [14] и Съеренсена-Чекановски (Q_s) [15, 16], рассчитанные по следующим формулам:

$$J = \frac{c}{a + b - c},$$

$$Q_s = \frac{2c}{a + b},$$

где c – число общих НОС для образцов А и В; a – НОС, присутствующие в А; b – НОС, присутствующие в В.

Сходство образцов по количественным данным (по содержанию отдельных соединений и групп соединений) оценивали при помощи индекса Мориситы (Мориситы-Хорна) [17]:

$$Cmh = \frac{2 \sum_i (a_n_i \cdot b_n_i)}{(da + db) \cdot aN \cdot bN},$$

где a_n_i – содержание i -го соединения (группы соединений) в образце А; b_n_i – то же для образца В; aN – суммарное содержание НОС в образце А; bN – то же для образца В; $da = \sum (a_n_i^2)/aN^2$, $db = \sum (b_n_i^2)/bN^2$.

Также для экстрагирования биологически активных веществ использовали 40%-ный водный этиловый спирт. Воздушно-сухие образцы рдеста *P. perfoliatus* (стебли и листья) измельчали. Растительное сырье экстрагировали при подобранном соотношении сырье-экстрагент 1 : 20 для устойчивости системы. Экстрагирование проводили на перемешивающем устройстве при комнатной температуре продолжительностью 7 суток. Затем полученный экстракт отделяли от травяного остатка фильтрованием, выпаривали и пастеризовали при 85 °C в течение 15–20 мин.

Одним из способов оценки АОА является колориметрия свободных стабильных радикалов, основанная на реакции ДРРН (ДФПГ) (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил ($C_{18}H_{12}N_5O_6$, $M=394.33$), растворенного в этаноле, с образцом антиоксиданта. В результате восстановления ДФПГ антиоксидантом снижается пурпурно-синяя окраска ДФПГ в этаноле, а реакция контролируется по изменению оптической плотности при длине волны 517 нм [18].

Исследование антиоксидантных свойств было проведено фотометрическим методом с 0.5 мМ спиртового раствора ДФПГ (Sigma-Aldrich) на цифровом фотоэлектроколориметре AP-101 (APEL, Япония). Для приготовления рабочих растворов применяли 96% этиловый спирт. Степень обесцвечивания раствора ДФПГ при добавлении экстрактов определяли при длине волны 517 нм. Для обеспечения статистической достоверности измерения были проведены через 60 мин в трех повторностях. В качестве контроля (без присутствия антиоксиданта) был взят раствор из 500 мкл спиртового раствора ДФПГ и 1500 мкл 96%-ного раствора этилового спирта.

АОА определяли с использованием конкрета водно-спиртового экстракта. Для приготовления рабочих проб с разными концентрациями экстракта использовали 10, 20, 50 и 100 мкл 1% водного раствора конкрета. Для сравнения АОА был проведен также анализ лекарственных препаратов: 5%-ный водно-солевой раствор аскорбиновой кислоты (ОАО «Борисовский завод медицинских препаратов», г. Борисов, Беларусь) и 1%-ный раствор эмоксипина (ФГУП «Московский эндокринный завод, г. Москва, Россия) [19].

В качестве показателей АОА были рассчитаны степень ингибирования ДФПГ (%) и АОА (%). Каждый опыт был повторен три раза, доверительный интервал вычисляли с использованием коэффициента Стьюдента (доверительная вероятность 0.95).

Обсуждение результатов

ГХ/МС исследование компонентного состава эфирного масла побегов *P. perfoliatus* показало наличие большого количества НОС, которые относятся к различным классам химических соединений (табл. 1, 2 и электронное приложение). Общий вид хроматограммы исследованного образца представлен на рисунке в электронном приложении.

Результаты исследования компонентного состава НОС рдеста пронзеннолистного из р. Волга показали, что его эфирное масло содержит 164 компонента, из которых было идентифицировано 151 соединение (табл. в электронном приложении). В таблице 1 представлены 46 субмажорных (более 0.1% суммарного содержания НОС) и мажорных (более 1% суммарного содержания НОС) компонентов, на долю которых приходилось 95.6% суммарного содержания НОС эфирного масла рдеста.

В составе НМ рдеста пронзеннолистного из култушной зоны р. Волги преобладали карбоновые кислоты, на долю которых приходилось более 82% суммарного содержания НОС (табл. 2). Этот результат резко контрастирует с данными по компонентному составу НМ этого же вида из Свирской губы Ладожского озера [13], где на карбоновые кислоты приходилось лишь 5.8% суммарного содержания НОС (табл. 2). Преобладали же в составе НМ рдеста из Ладожского озера альдегиды, спирты, углеводороды и кетоны с близкими значениями их содержания. Общее число обнаруженных НОС было выше у рдеста из р. Волги (164 НОС), чем у этого вида в Свирской губе Ладожского озера (134). Также у *P. perfoliatus* из р. Волги было существенно выше (в 3.5 раза) суммарное содержание НОС, чем в Ладожском озере – 150.7 мкг/г.сух.в. против 42.5 мкг/г.сух.в., что, вероятно, свидетельствует о более благоприятных условиях произрастания *P. perfoliatus* в култушной зоне р. Волги, чем в более холодных условиях Свирской губы Ладого. Известно, что компонентный состав НОС у водных растений становится более бедным как в качественном, так и в количественном отношении в более неблагоприятных условиях [20]. Сравнительные данные по *P. perfoliatus* из култушной зоне р. Волги и Свирской губы Ладожского озера подтверждают эту тенденцию.

Сравнение компонентного состава НМ рдеста пронзеннолистного из култушной зоны р. Волги с таким другим видом рдеста (*P. pectinatus*) также из водоемов Астраханской области [21] показал, что эти два вида значительно различаются по составу своего НМ на уровне групп химических соединений (табл. 2). Так, *P. perfoliatus* характеризовался значительно большим присутствием карбоновых кислот как в процентном, так и в абсолютном содержании. Для всех остальных групп соединений отмечено большее относительное содержание у рдеста гребенчатого из пойменных озер Волго-Ахтубинской поймы Астраханской области (табл. 2).

Оценка степени сходства состава НОС рдеста из р. Волги и Ладожского озера по соответствующим индексам (табл. 3) показала очень низкий уровень сходства метаболических профилей растений из разных географических мест обитания и по всем соединениям, и по мажорным соединениям, и по группам соединений (табл. 3). Особенно низкие показатели сходства (0.08 и 0.09) были получены при сравнении образцов по количественному содержанию отдельных компонентов и мажорных компонентов при помощи индекса Мориситы-Хорна.

Выявленное обстоятельство указывает на очень высокую пластичность НМ рассматриваемого вида и на его способность изменять компонентный состав НОС в зависимости от конкретных условий обитания.

С точки зрения возможности использования метаболитов того или иного растения для практических целей наибольшее значение имеют мажорные соединения, обеспечивающие основной функционал биологической активности НМ вида в том или ином местообитании.

Для образца *P. perfoliatus* из р. Волги можно указать на наличие всего четырех мажорных компонентов: тетрадекановая кислота (69.7%); гексадекановая кислота (10.1%); фитол (3.4%); фитон (1.4%).

Эти данные свидетельствуют, что рдест пронзеннолистный в водных биоценозах р. Волги может иметь серьезное влияние на фитопланктон, поскольку жирные кислоты (в том числе тетрадекановая и гексадекановая кислоты) являются выраженными аллелохемиками, проявляющими ингибиторную способность особенно в отношении цианобактерий [22–24]. При этом, учитывая их большую представленность у *P. perfoliatus*, чем у *P. pectinatus* в водоемах Астраханской области, можно предполагать, что первый вид будет иметь большее аллелопатическое воздействие на фитопланктон, чем рдест гребенчатый.

Таблица 1. Субмажорные и мажорные компоненты эфирного масла *P. perfoliatus*, произрастающего в р. Волге (Астраханская обл.) (RT – время удерживания, мин; RI – линейный индекс удерживания; % – доля компонента в эфирном масле; C_{ср} – концентрация вещества в сухом растении, мкг/г.сух.в.)

№	Соединение	Формула	RT	RI	%	C _{ср}
1	(E)-гекс-2-еналь	C ₆ H ₁₀ O	4.44	850	0.133	0.201
2	(E)-гекс-2-ен-1-ол	C ₆ H ₁₂ O	4.58	855	0.859	1.294
3	Гептаналь	C ₇ H ₁₄ O	6.09	906	0.110	0.165
4	Окт-7-ен-2-он	C ₈ H ₁₄ O	9.8	986	0.230	0.347
5	2-[(E)-пент-2-енил] фуран	C ₉ H ₁₂ O	10.51	1001	0.154	0.232
6	(3E, 5E)-окта-3,5-диен-2-он	C ₈ H ₁₂ O	15.96	1089	0.125	0.188
7	Нонаналь	C ₉ H ₁₈ O	16.81	1099	0.117	0.176
8	2-метил-4-фенилбутан-2-ол	C ₁₁ H ₁₆ O	31.46	1287	0.111	0.168
9	Нонановая кислота; [пеларгоновая кислота]	C ₉ H ₁₈ O ₂	32.4	1299	0.138	0.208
10	4-этилен-2-метоксифенол; [4-винилгуаякол]	C ₉ H ₁₀ O ₂	32.97	1309	0.132	0.198
11	2-(4-пропан-2-илфенил) пропаналь	C ₁₂ H ₁₆ O	37.01	1380	0.106	0.159
12	Декановая кислота; [каприновая кислота]	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	37.9	1395	0.156	0.235
13	Додекан-1-ол	C ₁₂ H ₂₆ O	41.25	1478	0.367	0.553
14	(E)-4-(2,6,6-триметилциклогексен-1-ил)бут-3-ен-2-он; [β-ионон]	C ₁₃ H ₂₀ O	41.35	1481	0.241	0.363
15	Тридеканаль	C ₁₃ H ₂₆ O	42.56	1510	0.219	0.330
16	2,4-дипрет-бутилфенол	C ₁₄ H ₂₂ O	42.71	1513	0.173	0.261
17	Додекановая кислота	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	46.17	1592	0.918	1.384
18	[2,2,4-триметил-3-(2-метилпропаноилокси)пентил] 2-метилпропаноат	C ₁₆ H ₃₀ O ₄	46.3	1595	0.132	0.198
19	(2Z)-2-бензилиденгептаналь; [жасминаль]	C ₁₄ H ₁₈ O	47.98	1645	0.124	0.186
20	Тетрадекан-1-ол	C ₁₄ H ₃₀ O	49.16	1681	0.206	0.311
21	Тридекановая кислота	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	49.26	1684	0.115	0.173
22	Гептадекан	C ₁₇ H ₃₆	49.82	1700	0.140	0.212
23	Пентадеканаль	C ₁₅ H ₃₀ O	50.19	1713	0.207	0.312
24	Тетрадекановая кислота; [миристиновая кислота]	C₁₄H₂₈O₂	54.27	1857	69.715	105.053
25	6,10,14-триметилпентадекан-2-он; [фитон]	C₁₈H₃₆O	54.4	1862	1.382	2.083
26	(E)-гексадец-9-ен-1-ол	C ₁₆ H ₃₂ O	55.12	1891	0.852	1.284
27	5-ундецилоксолан-2-он	C ₁₅ H ₂₈ O ₂	55.19	1894	0.296	0.446
28	7,9-дипрет-бутил-1-оксапиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-дион	C ₁₇ H ₂₄ O ₃	55.64	1923	0.194	0.292
29	6-децилоксан-2-он	C ₁₅ H ₂₈ O ₂	55.66	1924	0.130	0.195
30	3,7,11,15-тетраметилгексадец-1-ен-3-ол; [изофитол]	C ₂₀ H ₄₀ O	56.07	1957	0.150	0.226
31	(Z)-гексадец-11-еновая кислота	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	56.27	1972	0.904	1.362
32	Гексадекановая кислота; [пальмитиновая кислота]	C₁₆H₃₂O₂	56.63	2001	10.057	15.154
33	Неидентифицированное m/z 250? [M+], 82(100)		56.87	2027	0.129	0.194
34	Неидентифицированное m/z 276 [M+], 79(100)		57.32	2075	0.124	0.187
35	Октадекан-1-ол	C ₁₈ H ₃₈ O	57.47	2091	0.304	0.458
36	5-додецил оксолан-2-он	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	57.62	2109	0.299	0.450
37	1,1-дипроп-2-енокситетрадекан	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	57.66	2114	0.247	0.372
38	(E,7R,11R)-3,7,11,15-тетраметилгексадец-2-ен-1-ол; [фитол]	C₂₀H₄₀O	57.72	2122	3.419	5.152
39	6-додецилоксан-2-он	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	57.88	2143	0.270	0.406
40	1,1-дипроп-2-еноксипентадекан	C ₂₁ H ₄₀ O ₂	57.94	2151	0.342	0.515
41	(Z)-октадец-9-еновая кислота; [олеиновая кислота]	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	57.97	2155	0.257	0.388
42	[(1S,4S,9S,10R,13S)-5,9-диметил-14-метилен-5-тетрацикло[11.2.1.01,10.04,9]гексадеканил] метанол; [каур-16-ен-19-ол]	C ₂₀ H ₃₂ O	59.03	2306	0.245	0.369
43	[(1S,4S,9S,10R,13S)-5,9-диметил-14-метилен-5-тетрацикло[11.2.1.01,10.04,9]гексадеканил]метанол; [каур-16-ен-19-ол] (изомер)	C ₂₀ H ₃₂ O	59.08	2315	0.145	0.219
44	Неидентифицированное 314 [M+], 149 (100)		59.31	2352	0.136	0.205
45	Пентакозан	C ₂₅ H ₅₂	60.33	2500	0.134	0.202
46	Гептакозан	C ₂₇ H ₅₆	62.28	2700	0.693	1.044
ВСЕГО					95.64	144.11
Доля от суммарного содержания НОС, %					95.64	95.63
Суммарное содержание НОС					100.00	150.69

Примечание. Для некоторых соединений в квадратных скобках указаны тривиальные или наиболее часто употребляемые наименования; **полужирным курсивом** выделены мажорные соединения, доля которых превышала 1%.

Таблица 2. Сравнительное содержание (% по отношению к цельному эфирному маслу) и концентрация (С, мкг/г) основных групп веществ в образцах *P. perfoliatus* в фазу цветения/плодоношения в реке Волге и в Ладожском озере, и у *P. pectinatus* в озерах Астраханской области.

Группы веществ	<i>P. perfoliatus</i>				<i>P. pectinatus</i>	
	Волга		Ладожское озеро (Свирская губа)		Волго-Ахтубинская пойма	
	%	С	%	С	%	С
Азотсодержащие соединения	0.16	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
Альдегиды	1.77	2.67	20.17	8.57	2.01–8.57	1.76–17.41
Ароматические углеводороды	0.07	0.10	1.32	0.56	0.29–0.35	0.31–0.58
Карбоновые кислоты	82.41	124.19	5.82	2.47	29.28–40.00	35.11–59.47
Кетоны	2.81	4.24	15.42	6.55	14.51–18.46	12.73–37.49
Полифункциональные соединения	0.62	0.93	10.65	4.52	0.99–12.49	0.81–25.38
Спирты	7.22	10.88	18.32	7.78	16.71–17.42	14.67–35.38
Углеводороды	1.30	1.96	15.43	6.55	9.01–18.03	15.83–18.29
Фенолы	0.24	0.37	0.03	0.01	1.39–2.02	1.78–2.82
Эфиры	2.58	3.89	11.19	4.75	3.05–5.38	4.72–6.20
Неидентифицированные соединения	0.81	1.22	1.65	0.70	0–0.05	0.0–0.11
ВСЕГО	100.00	150.69	100.00	42.47	100.00	87.77–203.14

Таблица 3. Сходство НМ *P. perfoliatus* из р. Волга и Свирской губы Ладожского озера по индексам сходства Жаккара (J), Стьеренсена-Чекановски (Ks) по всем соединениям и по мажорным соединениям, и по индексу Мориситы-Хорна (Cmh) – по группам соединений, и по всем соединениям

Оцененное сходство	J	Ks	Cmh
По всем компонентам	0.19	0.31	0.08
По мажорным компонентам	0.11	0.2	0.09
По группам НОС	–	–	0.18

Примечание. «–» – не оценивалось.

Наши исследования показали, что в различных литоральных местообитаниях в Ладожском озере численность цианобактерий имеет сильную достоверную связь ($R^2=0.719$; $p<0.05$) с содержанием жирных кислот (включая тетрадекановую и гексадекановую) у рдеста пронзеннолистного, уменьшаясь с увеличением концентрации этих аллелохимиков в составе НМ [25].

Для *Ceratophyllum demersum* L., произрастающего в пойменном озере с изменяющимся трофическим состоянием в Астраханской обл., было показано, что фракция свободных жирных кислот (включая тетрадекановую и гексадекановую), выполняя аллелопатическую функцию, преобладала в составе НМ роголистника при «макрофитном» мезотрофном состоянии озера с низкой численностью цианобактерий в фитопланктоне озера [26]. Данные обстоятельства говорят о том, что *P. perfoliatus* из р. Волги может служить сырьем для получения эффективных аллелохимиков при создании композитов альгицидов нового поколения для борьбы с цианобактериальным «цветением» [25].

Имеются данные, что тетрадекановая кислота обладает антибактериальной и фунгицидной активностью, приводящей к подавлению развития патогенной микрофлоры, способствуя восстановлению защитных свойств кожи [27]. Миристиновую и пальмитиновую кислоты также применяют в качестве структурообразователей, эмульгаторов и загустителей в косметической промышленности. В мыловарении эфирные масла с высоким содержанием миристиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот рекомендуются для приготовления твердого мыла [28].

Вопрос об экологической роли третьего по значимости мажорного компонента у *P. perfoliatus* из р. Волги, фитола, неоднозначен и еще плохо изучен. В частности, имеются данные, что это соединение проявляет биологическую активность против различных инфекций [29], а в отношении растительоядных насекомых показано наличие у фитола защитной и отпугивающей функции, в том числе для водных растений (*Nuphar lutea* (L.) Smith) [30, 31].

Фитол является одноненасыщенным дитерпеном и входит в состав хлорофилла, витамина Е, витамина К. Фитол – ценный компонент, который обладает выраженной биологической активностью, широко используется в качестве ароматизатора, а также в фармацевтической и биотехнологической промышленности. Ис-

следования показали, что фитол обладает анксиолитическим, цитотоксическим, антиоксидантным, антиноцицептивным, противовоспалительным, иммуномодулирующим и антимикробным эффектами [32].

Для четвертого мажорного компонента, фитона, как и для фитола, указываются следующие свойства: противовоспалительные, противомикробные, антиоксидантные, спазмолитические, противоопухолевые. Эти соединения (фитол и фитон) могут выступать в качестве антидотов, цитотоксических и успокоительных средств, использоваться при заболеваниях дыхательных путей, при конъюнктивите, фурункулезе, в составе компрессов для очищения открытых ран, при диабете [33]. Таким образом, *P. perfoliatus* может выступать в качестве природного возобновляемого ресурса для получения ценных природных форм фитола и фитона растительного происхождения для различных типов применения в фармакологии, медицине, косметологии.

Ряд минорных компонентов, обнаруженных у рдеста пронзеннолистного, широко используются в промышленности в качестве пищевых ароматизаторов и добавок, например, сафраналь имеет запах шафрана, лимонен – цитрусовый запах, бензальдегид – аромат миндаля, ионон – запах фиалки и др.), в качестве отдушек парфюмерно-косметических композиций и ароматизаторов (гераниллиналоол, бензальдегид, лимонен, α -терпинеол), компонентов ароматических масел и пищевых добавок (гераниллиналоол), компонентов медицинских препаратов (эудесмол) [34, 35].

Среди выделенных веществ особое внимание заслуживают компоненты, обладающие антибактериальной, антиоксидантной, фунгицидной и противовирусной активностью. К ним относятся соединения разных классов: гексаналь, лимонен, бензальдегид, фитол, α -терпинеол.

В результате проведенного спектрофотометрического анализа водно-спиртового экстракта рдеста пронзеннолистного из р. Волги и лекарственных препаратов (аскорбиновая кислота и эмоксипин) были определены их АОА и степень ингибирования ДФПГ (табл. 4).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшей АОА обладает водно-спиртовый экстракт *P. perfoliatus* при всех исследованных концентрациях. С увеличением действующего объема экстракта рдеста с 10 до 100 мкл АОА увеличивается с 61 до 85%. Как и в случае с АОА, высокая степень ингибирования свободно-радикальных процессов проявилась в экстракте рдеста пронзеннолистного. Максимальное значение степени ингибирования экстракта *P. perfoliatus* при объеме 100 мл составляет 116.24%.

Растворы лекарственных препаратов аскорбиновой кислоты и эмоксипина, которые были взяты для сравнения, по литературным данным обладают выраженной АОА, однако проведенные исследования показали низкую АОА и степень ингибирования ДФПГ по сравнению с водно-спиртовым экстрактом рдеста пронзеннолистного. Это можно объяснить тем, что рдест пронзеннолистный содержит в своем составе компоненты, обладающие выраженными антирадикальными свойствами (фитол, фитон, ретинол, сквален, 2,4-ди-*трет*-бутилфенол и др.).

Таблица 4. Антиоксидантная активность (АОА, %) и степень ингибирования (СИ, %) водно-спиртового экстракта *P. perfoliatus* и лекарственных препаратов

Концентрация образца, мкл/проба	Исследуемый образец	АОА, %	СИ, %
10	Аскорбиновая кислота	12.12±0.01	18.31±0.03
	Эмоксипин	35.62±0.01	31.05±0.02
	<i>P.perfoliatus</i>	61.27±0.02	92.79±0.01
20	Аскорбиновая кислота	11.43±0.02	16.97±0.01
	Эмоксипин	44.27±0.01	37.31±0.01
	<i>P.perfoliatus</i>	65.11±0.01	96.21±0.01
50	Аскорбиновая кислота	21.41±0.03	27.10±0.04
	Эмоксипин	76.74±0.02	70.65±0.02
	<i>P.perfoliatus</i>	77.75±0.02	109.51±0.02
100	Аскорбиновая кислота	23.76±0.01	30.07±0.02
	Эмоксипин	41.11±0.01	35.32±0.01
	<i>P.perfoliatus</i>	85.33±0.01	116.24±0.01

Заключение

В результате проведенных исследований впервые выявлен качественный и количественный компонентный состав НОС эфирного масла рдеста пронзеннолистного (*Potamogeton perfoliatus* L., семейство Ро-

tamogetonaceae), произрастающего в култушной зоне р. Волги, в фазе цветения. В составе НМ *P. perfoliatus* выявлено 164 компонента, из которых было идентифицировано 151 соединение. В составе НМ рдеста пронзеннолистного из култушной зоны р. Волги преобладали карбоновые кислоты (82%), из которых наиболее обильными были тетрадекановая (69.7%) и гексадекановая (10.1%) кислоты, активные аллелохимики. Также мажорными компонентами в составе НМ *P. perfoliatus* из реки Волги являлись фитол (3.4%); фитон (1.4%), характеризующиеся разноплановой биологической активностью. Кроме того, среди НОС – метаболитов *P. perfoliatus* выявлено большое число минорных компонентов, являющихся биологически активными соединениями.

Высокую биологическую активность НМ рдеста пронзеннолистного из р. Волги подтвердил проведенный анализ по определению АОО водно-спиртового экстракта *P. perfoliatus*. Сравнительные исследования антиоксидантных свойств водно-спиртового экстракта рдеста пронзеннолистного и лекарственных препаратов-антиоксидантов показали, что экстракт *P. perfoliatus* обладает более выраженными антиоксидантными свойствами, чем протестированные лекарственные препараты.

Таким образом, *P. perfoliatus* из култушной зоны р. Волги в силу специфики компонентного состава его НМ может выступать в качестве природного возобновляемого ресурса для получения сырья для создания эффективных композитов альгицидов нового поколения для борьбы с цианобактериальным «цветением», а также для получения ценных природных форм НОС (в том числе, фитола и фитона) растительного происхождения для различных типов применения в фармакологии, медицине, косметологии, пищевой промышленности и т.д.

Список литературы

1. Доброхотова К.В. Ассоциации высших водных растений как фактор роста дельты Волги // Труды Астраханского государственного Заповедника. 1940. Т. 3. С. 13–84.
2. Громов В.В. Водная и прибрежно-водная растительность авандельты р. Волги и Северного Каспия // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2009. №3. С. 286–298.
3. Громов В.В. Водная и прибрежно-водная растительность Северного Каспия: авандельта реки Волги, калмыцкое и казахское побережья // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2010. №3. С. 250–266.
4. Губанов И.А., Киселёва К.В., Новиков В.С., Тихомиров В.Н. Иллюстрированный определитель растений Средней России: в 3 т., 2-е изд., испр. и доп. М., 2002. Т. 1. 526 с.
5. Cowan M.M. Plant Products as Antimicrobial Agents // Clinical Microbiology Reviews. 1999. Vol. 12. N4. Pp. 564–582. DOI: 10.1128/cmr.12.4.564.
6. Vertuani S., Angusti A., Manfredini S. The antioxidants and pro-antioxidants network: an overview // Curr. Pharm. Design. 2004. Vol. 10. N14. Pp. 1677–1694. DOI: 10.2174/1381612043384655.
7. Хасина Э.И., Коленченко Е.А., Сгребнева М.Н. Антиоксидантная активность низкоэтерифицированного пектина из морской травы *Zostera marina* // Биология моря. 2003. Т. 29. №4. С. 291–293.
8. Ширшова Т.И., Чадин И.Ф., Володин В.В. Биологически активные вещества в составе водных растений рода *Potamogeton* (Potamogetonaceae) // Успехи современной биологии. 2012. Т. 132. №4. С. 401–415.
9. Новиченко О.В. Биологически активные вещества высших водных растений *Potamogeton perfoliatus* L. и *Zostera noltii*: состав, свойства, применение // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. №1. С. 137–142.
10. ГОСТ 31412-2012. Водоросли, травы морские и продукция из них. Методы определения органолептических и физических показателей. М., 2012. 12 с.
11. ГОСТ 24027.2-80. Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла. М., 1980. 8 с.
12. Ткачев А.В. Исследование летучих веществ растений. Новосибирск, 2008. 969 с.
13. Крылова Ю.В., Курашов Е.А., Митрукова Г.Г. Компонентный состав эфирного масла *Potamogeton perfoliatus* L. из Ладожского озера в начале периода плодоношения // Химия растительного сырья. 2016. №2. С. 79–88. DOI: 10.14258/jcprm.2016021189.
14. Jaccard P. Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques regions voisines // Bull. Soc. Vaudoise sci. Natur. 1901. Vol. 37. N140. Pp. 241–272.
15. Czekanowski J. Coefficient of racial likeness and durchschnittliche Differenz // Anthropol. Anz. 1922. Vol. 9. Pp. 227–249.
16. Sorensen T.A. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content, and its application to analyses of the vegetation on Danish commons // Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Biologiske Skrifter. 1948. Vol. 5. Pp. 1–34.
17. Morisita M. Measuring of interspecific association and similarity between communities // Memoires of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology). 1959. Vol. 3. Pp. 65–80.

18. Хасанов В.В., Рыжова Г.Л., Мальцева Е.В. Методы исследования антиоксидантов // Химия растительного сырья. 2004. №3. С. 63–75.
19. Коленченко Е.А., Сони́на Л.Н., Хотимченко Ю.С. Сравнительная оценка антиоксидантной активности низкоэтерифицированного пектина из морской травы *Zostera marina* и препаратов-антиоксидантов *in vitro* // Биология моря. 2005. Т. 31. №5. С. 380–383.
20. Курашов Е.А., Крылова Ю.В., Егорова А.А., Сущенко А.С., Ходонович В.В., Явид Е.Я. Перспективы использования низкомолекулярного метаболома водных макрофитов для индикации экологического состояния водных экосистем // Вода: химия и экология. 2018. №1-3. С. 68–79.
21. Курашов Е.А., Крылова Ю.В., Русанов А.Г. Изменение низкомолекулярного метаболома чужеродного вида *Potamogeton pectinatus* L. в Ладожском озере в сравнении с нативным ареалом // Российский журнал биологических инвазий. 2020. Т. 13. №2. С. 74–95.
22. Nakai S., Inoue Y., Hosomi M., Murakami A. Myriophyllum spicatum-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* // Water Res. 2000. Vol. 34(11). Pp. 3026–3032. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00039-7.
23. Wang H.Q., Zhang L.Y. Allelopathic activity of ethyl acetate extracts from typical emergent plants against *Microcystis aeruginosa* Kütz // Bangladesh J. Bot. 2017. Vol. 46. N3. Pp. 1025–1029.
24. Kurashov E., Kapustina L., Krylova J., Mitrukova G. The use of fluorescence microscopy to assess the suppression of the development of cyanobacteria under the influence of allelochemicals of aquatic macrophytes // Fluorescence Methods for Investigation of Living Cells and Microorganisms. IntechOpen, 2020. 28 p. DOI: 10.5772/intechopen.92800.
25. Kurashov E., Krylova J., Protopopova E. The Use of Allelochemicals of Aquatic Macrophytes to Suppress the Development of Cyanobacterial “Blooms” // Plankton Communities. IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.95609.
26. Kurashov E.A., Mitrukova G.G., Krylova Yu.V. Interannual Variability of Low-Molecular Metabolite Composition in *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae) from a Floodplain Lake with a Changeable Trophic Status // Contemporary Problems of Ecology. 2018. Vol. 11. N2. Pp. 179–194. DOI: 10.1134/S1995425518020063.
27. Chen X., Zhao X., Deng Y., Bu X., Ye H., Guo N. Antimicrobial potential of myristic acid against *Listeria monocytogenes* in milk // The Journal of Antibiotics. 2019. Vol. 72. Pp. 298–305. DOI: 10.1038/s41429-019-0152-5.
28. Mancini A., Imperlini E., Nigro E., Montagnese C., Daniele A., Orrù S., Buono P. Biological and Nutritional Properties of Palm Oil and Palmitic Acid: Effects on Health (Review) // Molecules. 2015. Vol. 20. Pp. 17339–17361. DOI: 10.3390/molecules200917339.
29. Kurashov E.A., Fedorova E.V., Krylova J.V., Mitrukova G.G. Assessment of the Potential Biological Activity of Low Molecular Weight Metabolites of Freshwater Macrophytes with QSAR // Scientifica. 2016. Vol. 2016. 1205680. DOI: 10.1155/2016/1205680.
30. Anderson P.M., Hilker M., Hansson B.S., Bombosch S., Klein B., Schildknecht H. Oviposition deterring components in larval frass of *Spodoptera littoralis* (Boisd.) (Lepidoptera: Noctuidae): A behavioral and electrophysiological evaluation // J. Insect Physiol. 1993. Vol. 39. Pp. 129–137.
31. Vencl F.V., Morton T.C. The shield defense of the sumac flea beetle, *Blepharida rhois* (Chrysomelidae: Alticinae) // Chemoecology. 1998. Vol. 8. Pp. 25–32. DOI: 10.1007/pl00001800.
32. Islam M.T., Ali E.S., Uddin S.J., Shaw S., Islam Md A., Ahmed Md I., Shill M.C., Karmakar U.K., Yarla N.S., Khan I.N., Billah Md M., Pieczynska M.D., Zengin G., Malainer C., Nicoletti F., Gulei D., Berindan-Neagoe I., Apostolov A., Atanasov A.G. Phytol: A review of biomedical activities // Food and Chemical Toxicology. 2018. Vol. 121. Pp. 82–94. DOI: 10.1016/j.fct.2018.08.032.
33. Asakawa Y., Kenmoku H. Dietary Diterpenoids // Handbook of Dietary Phytochemicals. Springer, Singapore, 2021. Pp. 1–195. DOI: 10.1007/978-981-13-1745-3_18-1.
34. Смирнов Е.В. Пищевые ароматизаторы // Пищевая промышленность. 2005. №5. С. 10–15.
35. Спецификации и стандарты на пищевые продукты, пищевые добавки и пр. в соответствии с Законом о пищевой санитарии (выдержка) 2010 года. JETRO, 2011. 189 с.

Поступила в редакцию 28 марта 2022 г.

После переработки 21 мая 2022 г.

Принята к публикации 23 мая 2022 г.

Для цитирования: Крылова Ю.В., Новиченко О.В., Курашов Е.А. Компонентный состав низкомолекулярного метаболома и антиоксидантная активность *Potamogeton perfoliatus* L. (Potamogetonaceae), произрастающего в Астраханской области // Химия растительного сырья. 2022. №4. С. 143–153. DOI: 10.14258/jscrpm.20220411179.

Krylova Yu.V.^{1,2}, Novichenko O.V.³, Kurashov Ye.A.^{2*} COMPONENT COMPOSITION OF ESSENTIAL OIL AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF *POTAMOGETON PERFOLIATUS* L. (POTAMOGETONACEAE) GROWING IN THE ASTRAKHAN REGION

¹ St. Petersburg branch of FGBNU "VNIRO" ("GosNIORKh" named after L.S. Berg), nab. Makarova, 26, St. Petersburg, 199053 (Russia)

² Institute of Lake Science of the Russian Academy of Sciences, a separate subdivision of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, ul. Sevastyanova, 9, St. Petersburg, 196105 (Russia), e-mail: evgeny_kurashov@mail.ru;

³ Astrakhan State University, ul. Tatishcheva, 20A, 1, Astrakhan, 414056 (Russia)

For the first time, the component composition of the low-molecular-weight metabolome of perfoliate pondweed (*Potamogeton perfoliatus* L., family Potamogetonaceae), which grows in the Astrakhan region (lower zone of the Volga river delta), has been investigated. Low molecular weight organic compounds (LMWOCs) in the composition of essential oil were obtained from dried plants by steam hydrodistillation using the Clevenger apparatus. The qualitative and quantitative compositions of the LMWOCs were investigated using gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS complex TRACE ISQ (Thermo Scientific) with a quadrupole mass analyzer). The low molecular weight metabolome of *P. perfoliatus* contained 164 components, of which 151 were identified. Major LMWOCs were carboxylic acids – tetradecanoic (69.7%) and hexadecanoic (10.1%), as well as phytol (3.4%) and phytol (1.4%), characterized by diverse biological activities. The antioxidant activity of an aqueous-alcoholic extract of *P. perfoliatus* was investigated by a photometric method based on the reaction of DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) dissolved in ethanol with an antioxidant sample. It has been shown that *P. perfoliatus* extract has more pronounced antioxidant properties than the tested drugs (ascorbic acid and emoxipine). *P. perfoliatus* from the lower zone of the Volga River delta can be considered as a naturally renewable resource for obtaining raw materials for creating effective composites of new generation algicides to combat cyanobacterial "bloom", as well as for obtaining valuable natural forms of LMWOCs of plant origin for various types of application in pharmacology, medicine, cosmetology, food industry, and other industries.

Keywords: perfoliate pondweed, *Potamogeton perfoliatus* L., low-molecular-weight organic compounds, gas chromatography-mass spectrometry, essential oil, component composition, antioxidant activity, Volga river.

Referenses

1. Dobrokhotova K.V. *Trudy Astrakhan-skogo gosudarstvennogo Zapovednika*, 1940, vol. 3, pp. 13–84. (in Russ.).
2. Gromov V.V. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya*, 2009, no. 3, pp. 286–298. (in Russ.).
3. Gromov V.V. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2010, no. 3, pp. 250–266. (in Russ.).
4. Gubanov I.A., Kiselova K.V., Novikov V.S., Tikhomirov V.N. *Illyustrirovannyi opredelitel' rasteniy Sredney Rossii: v 3 t., 2-ye izd., ispr. i dop.* [Illustrated guide to plants in Central Russia: in 3 volumes, 2nd ed., corrected. and additional]. Moscow, 2002, vol. 1, 526 p. (in Russ.).
5. Cowan M.M. *Clinical Microbiology Reviews*, 1999, vol. 12, no. 4, pp. 564–582. DOI: 10.1128/cmr.12.4.564.
6. Vertuani S., Angusti A., Manfredini S. *Curr. Pharm. Design*, 2004, vol. 10, no. 14, pp. 1677–1694. DOI: 10.2174/1381612043384655.
7. Khasina E.I., Kolenchenko Ye.A., Sgrebneva M.N. *Biologiya moray*, 2003, vol. 29, no. 4, pp. 291–293. (in Russ.).
8. Shirshova T.I., Chadin I.F., Volodin V.V. *Uspekhi sovremennoy biologii*, 2012, vol. 132, no. 4, pp. 401–415. (in Russ.).
9. Novichenko O.V. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*, 2016, no. 1, pp. 137–142. (in Russ.).
10. GOST 31412-2012. *Vodorosli, travy morskoye i produktsiya iz nikh. Metody opredeleniya organolepticheskikh i fizicheskikh pokazateley.* [GOST 31412-2012. Algae, sea grasses and products from them. Methods for determining organoleptic and physical indicators]. Moscow, 2012, 12 p. (in Russ.).
11. GOST 24027.2-80. *Syr'ye lekarstvennoye rastitel'noye. Metody opredeleniya vlazhnosti, sodержaniya zoly, ekstraktivnykh i dubil'nykh veshchestv, efirnogo masla.* [GOST 24027.2-80. Raw medicinal vegetable. Methods for determining moisture, ash content, extractive and tannins, essential oils]. Moscow, 1980, 8 p. (in Russ.).
12. Tkachev A.V. *Issledovaniye letuchikh veshchestv rasteniy.* [Study of volatile substances of plants]. Novosibirsk, 2008, 969 p. (in Russ.).
13. Krylova Yu.V., Kurashov Ye.A., Mitrukova G.G. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2016, no. 2, pp. 79–88. DOI: 10.14258/jcprm.2016021189. (in Russ.).
14. Jaccard P. *Bull. Soc. Vaudoise sci. Natur*, 1901, vol. 37, no. 140, pp. 241–272.
15. Czekanowski J. *Anthropol. Anz.*, 1922, vol. 9, pp. 227–249.
16. Sorensen T.A. *Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Biologiske Skrifter*, 1948, vol. 5, pp. 1–34.
17. Morisita M. *Memoires of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology)*, 1959, vol. 3, pp. 65–80.
18. Khasanov V.V., Ryzhova G.L., Mal'tseva Ye.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2004, no. 3, pp. 63–75. (in Russ.).
19. Kolenchenko Ye.A., Sonina L.N., Khotimchenko Yu.S. *Biologiya moray*, 2005, vol. 31, no. 5, pp. 380–383. (in Russ.).
20. Kurashov Ye.A., Krylova Yu.V., Yegorova A.A., Sushchenko A.S., Khodonovich V.V., Yavid Ye.Ya. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2018, no. 1-3, pp. 68–79. (in Russ.).

* Corresponding author.

21. Kurashov Ye.A., Krylova Yu.V., Rusanov A.G. *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 74–95. (in Russ.).
22. Nakai S., Inoue Y., Hosomi M., Murakami A. *Water Res.*, 2000, vol. 34(11), pp. 3026–3032. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00039-7.
23. Wang H.Q., Zhang L.Y. *Bangladesh J. Bot.*, 2017, vol. 46, no. 3, pp. 1025–1029.
24. Kurashov E., Kapustina L., Krylova J., Mitrukova G. *Fluorescence Methods for Investigation of Living Cells and Microorganisms*. IntechOpen, 2020, 28 p. DOI: 10.5772/intechopen.92800.
25. Kurashov E., Krylova J., Protopopova E. *Plankton Communities*. IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.95609.
26. Kurashov E.A., Mitrukova G.G., Krylova Yu.V. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 179–194. DOI: 10.1134/S1995425518020063.
27. Chen X., Zhao X., Deng Y., Bu X., Ye H., Guo N. *The Journal of Antibiotics*, 2019, vol. 72, pp. 298–305. DOI: 10.1038/s41429-019-0152-5.
28. Mancini A., Imperlini E., Nigro E., Montagnese C., Daniele A., Orrù S., Buono P. *Molecules*, 2015, vol. 20, pp. 17339–17361. DOI: 10.3390/molecules200917339.
29. Kurashov E.A., Fedorova E.V., Krylova J.V., Mitrukova G.G. *Scientifica*, 2016, vol. 2016, 1205680. DOI: 10.1155/2016/1205680.
30. Anderson P.M., Hilker M., Hansson B.S., Bombosch S., Klein B., Schildknecht H. *J. Insect Physiol.*, 1993, vol. 39, pp. 129–137.
31. Vencel F.V., Morton T.C. *Chemoecology*, 1998, vol. 8, pp. 25–32. DOI: 10.1007/pl00001800.
32. Islam M.T., Ali E.S., Uddin S.J., Shaw S., Islam Md A., Ahmed Md I., Shill M.C., Karmakar U.K., Yarla N.S., Khan I.N., Billah Md M., Pieczynska M.D., Zengin G., Malainer C., Nicoletti F., Gulei D., Berindan-Neagoie I., Apostolov A., Atanasov A.G. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, vol. 121, pp. 82–94. DOI: 10.1016/j.fct.2018.08.032.
33. Asakawa Y., Kenmoku H. *Handbook of Dietary Phytochemicals*. Springer, Singapore, 2021, pp. 1–195. DOI: 10.1007/978-981-13-1745-3_18-1.
34. Smirnov Ye.V. *Pishchevaya promyshlennost'*, 2005, no. 5, pp. 10–15. (in Russ.).
35. *Spetsifikatsii i standarty na pishchevyye produkty, pishchevyye dobavki i pr. v sootvetstvii s Zakonom o pishche-voy sanitarii (vyderzhka) 2010 goda*. [Specifications and Standards for Foods, Food Additives, etc. under the Food Sanitation Act (Excerpt) 2010]. JETRO, 2011, 189 p. (in Russ.).

Received March 28, 2022

Revised May 21, 2022

Accepted May 23, 2022

For citing: Krylova Yu.V., Novichenko O.V., Kurashov Ye.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 4, pp. 143–153. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20220411179.

