

ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 574.5+ (581.19:582.5)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНОГО МЕТАБОЛОМА ГОРЦА ЗЕМНОВОДНОГО (*PERSICARIA AMPHIBIA* (L.) DELARBRE) ИЗ РАЗНОТИПНЫХ МЕСТООБИТАНИЙ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ

Ю. В. Крылова¹, Е. А. Курашов^{1,2}, А. Г. Русанов²

¹ Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга), Россия

² Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

Впервые проведено хромато-масс-спектрометрическое исследование низкомолекулярного метаболома (НМ) горца земноводного (*Persicaria amphibia* (L.) Delarbre, семейство Polygonaceae Juss.) в фазе цветения, произрастающего в разнотипных биотопах Ладожского озера, с целью выявления его качественного и количественного состава. Эфирное масло, содержащее низкомолекулярные органические соединения (НОС), получали из высушенных растений методом паровой гидродистилляции с использованием аппарата Клевенджера. Состав и содержание НОС в эфирном масле выявляли при помощи хромато-масс-спектрометрического комплекса TRACE DSQ II (Thermo Electron Corporation) в программном режиме температур с использованием декафторбензофенона и бензофенона в качестве внутренних стандартов. Всего обнаружено 124 НОС, из которых идентифицировано 110. Среди НОС горца земноводного преобладали карбоновые кислоты (50–60 % по содержанию), альдегиды (9–14 %) и углеводороды (6–9 %). НМ *P. amphibia* из биотопа, в недавнем прошлом находившегося под сильным антропогенным воздействием (стоки ЦБК и деревообрабатывающих предприятий), характеризовался наименьшим числом НОС (87 против 107 и 114) и их общим содержанием в 3–3,5 раза ниже, чем у растений, произрастающих в более благоприятных условиях. Наличие целого ряда биологически активных метаболитов в составе НМ *P. amphibia* свидетельствует о выраженном влиянии данного растения на гидробиоценозы литорали Ладоги.

Ключевые слова: *Persicaria amphibia*; низкомолекулярные органические соединения; низкомолекулярный метаболом; газовая хромато-масс-спектрометрия; Ладожское озеро.

J. V. Krylova, E. A. Kurashov, A. G. Rusanov. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COMPONENT COMPOSITION OF THE LOW MOLECULAR WEIGHT METABOLOME OF WATER SMARTWEED (*PERSICARIA AMPHIBIA* (L.) DELARBRE) FROM DIVERSE HABITATS IN LAKE LADOGA

A chromatographic-mass spectrometric study of the low molecular weight metabolome (LMWM) of water smartweed (*Persicaria amphibia* (L.) Delarbre, family Polygonaceae Juss.), growing in various biotopes of Lake Ladoga, was carried out for the first time during the flowering phase in order to reveal its qualitative and quantitative composition. Essential oil containing low molecular weight organic compounds (LMWOC) from dried plants was obtained by Clevenger hydrodistillation with steam. The composition and content of LMWOC in the essential oil were detected using a TRACE DSQ II chromatomass spectrometric complex (Thermo Electron Corporation) in a programmed temperature mode using decafluorobenzophenone and benzophenone as internal standards. A total of 124 LMWOC were detected, of which 110 were identified. Carboxylic acids (50–60 % by content), aldehydes (9–14 %) and hydrocarbons (6–9 %) prevailed among the LMWOC in the water smartweed. The LMWM of *P. amphibia* from the biotope exposed until recently to heavy human impact (effluents from the pulp and paper industry and woodworking enterprises) featured the smallest number of LMWOC (87 versus 107 and 114 in other biotopes), and their total content was 3–3.5 times lower than in plants growing under more favourable conditions. The presence of a number of biologically active metabolites in the LMWM of water smartweed suggests this plant has a pronounced effect on littoral aquatic organisms communities in Lake Ladoga.

Key words: *Persicaria amphibia*; low molecular weight organic compounds; low molecular weight metabolome; gas chromatography-mass spectrometry; Lake Ladoga.

Введение

На современном этапе развития гидроэкологии существует понимание, что низкомолекулярные органические соединения (НОС) (первичные и вторичные метаболиты) водных растений играют весьма значимую роль в формировании и функционировании сообществ гидробионтов в водных экосистемах [Гуревич, 1978; Fink, 2007; Kurashov et al., 2014].

Горец земноводный *Persicaria amphibia* (L.) Delarbre (синоним *Polygonum amphibium*), или водяная гречиха (рис. 1), относится к семейству гречишных (Polygonaceae Juss.). Горец является многолетним растением и встречается в двух формах: водной и наземной. Стебель у водной формы ветвистый, достигает в длину 150 см. Длинночерешковые листья плавают по поверхности воды. Листовые пластинки продолговатые, голые, блестящие, по краю часто с короткими волосками, тупые или коротко заостренные, длиной от 5 до 17 см и шириной 1–5 см. Цветки расположены в густых широких колосовидных кистях, длина которых 2–6 см, а ширина 0,7–1,5 см, на голых цветоносах, возвышающихся над водой [Кашина, Тупицына, 1992].

Горец земноводный широко распространен на территории всего Северного полушария, интродуцирован в Мексике, Южной Америке и Южной Африке [Hinds, Freeman, 2005], является одним из руководящих видов, создающим

пять растительных ассоциаций в Ладожском озере [Распопов, 1985].

Однако из многочисленных (129) видов рода *Persicaria* [*Persicaria*...] *P. amphibia* в отношении химического состава является, по-видимому, одним из наименее изученных, так как информация о полном составе его низкомолекулярного метаболома (НМ) в литературе отсутствует. Например, в эфирном масле *Persicaria minor* (Huds.) Opiz выявлено от 44 до 69 соединений [Christopher et al., 2015; Rahnamaie-Tajadod et al., 2019], при этом данный вид характеризуется высоким уровнем синтеза вторичных метаболитов, особенно флавоноидов и терпеноидов [Christopher et al., 2015]. Относительно *P. amphibia* и других исследованных представителей этого рода известно, что у них отсутствуют экдистероиды [Volodin et al., 2002]. Сведения о фитохимическом составе некоторых других видов рода содержатся в публикациях [Prota, 2014; Abbasi et al., 2015; Hao et al., 2015].

Наряду с прочими водными растениями горец земноводный оказывает специфическое воздействие на других гидробионтов, формируя среду обитания, в том числе посредством синтеза первичных и вторичных низкомолекулярных метаболитов. С другой стороны, конкретный состав НМ *P. amphibia* будет зависеть от его реакции на биотические и абиотические факторы водной среды, включая антропогенный. Закономерности изменения НМ горца



Рис. 1. Горец земноводный (Ладожское озеро)

Fig. 1. Water smartweed (Lake Ladoga)

земноводного в тех или иных условиях также не изучены, хотя известно, что НМ водных растений является весьма подвижной системой, чутко реагирующей на изменения окружающей среды, в том числе на биотические и абиотические стрессы [Крылова и др., 2016; Kurashov et al., 2018; Baharum et al., 2018].

Помимо экологической роли НОС, синтезируемые *P. amphibia*, могут иметь важное прикладное значение. Так же, как и другие виды рода *Persicaria*, которые широко используются в фармакологии и медицине (в том числе традиционной) [Zhou et al., 2011; Zheng et al., 2014; Nan et al., 2018], горец земноводный является ценным природным ресурсом, так как обладает тонизирующими, мочегонными, кровоостанавливающими свойствами, применяется при желудочно-кишечных заболеваниях, при профилактике и лечении повышенного артериального давления, подагры, ревматизма, мочекаменной болезни, холецистита, нервных заболеваний [Горец...; Zhou et al., 2011].

По приблизительным оценкам, не менее 50 000–80 000 видов цветковых растений в мире используются для медицинских целей [Duke, 2009]. Водные растения в сравнении с наземными в этом отношении существенно недооценены и недоиспользуются (как минимум на порядок), хотя являются богатым источником ценных биоактивных соединений и перспективны для разнопланового использования, в том числе для биомониторинга, фитореме-

диации и как лекарственные растения [Swapna et al., 2011; Aasim et al., 2019].

В этой связи целью работы было изучить компонентный и количественный состав НМ горца земноводного из Ладожского озера и оценить степень сходства НМ растений из разнотипных биотопов.

Материалы и методы

Исследованные места обитания

Полевые исследования проводились в разных районах северной части Ладожского озера: в проливе напротив г. Питкяранта, около пос. Ляскеля и в Якимварском заливе около пос. Сорола (Республика Карелия) с 22 по 25 июля 2014 г. (рис. 2). Средние значения (медиана) некоторых основных показателей состояния водной среды местообитаний *P. amphibia* представлены в табл. 1. Для исследования отбирались растения, относящиеся к водной форме горца земноводного.

Станция «Питкяранта». Местообитание в районе г. Питкяранта представляло собой затишную заиленную литораль в техногенно загрязненном ландшафте. Грунт – заиленный песок с растительными остатками. Топкий илистый берег зарастал хвощом приречным (*Equisetum fluviatile* L.), тростником южным (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) и осокой острой (*Carex acuta* L.). На мелководье встре-

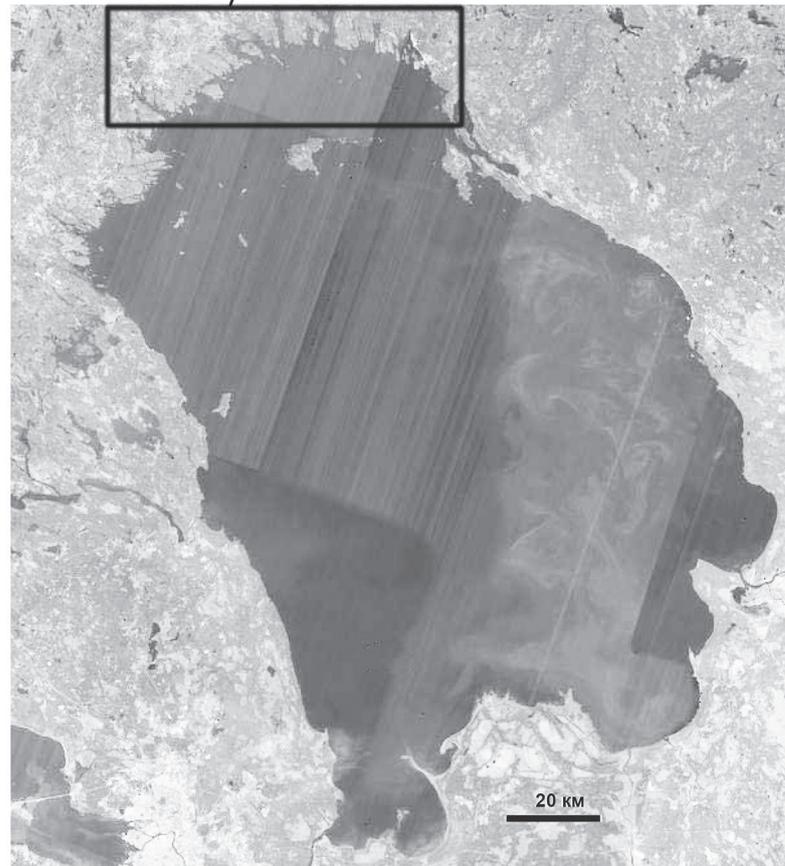
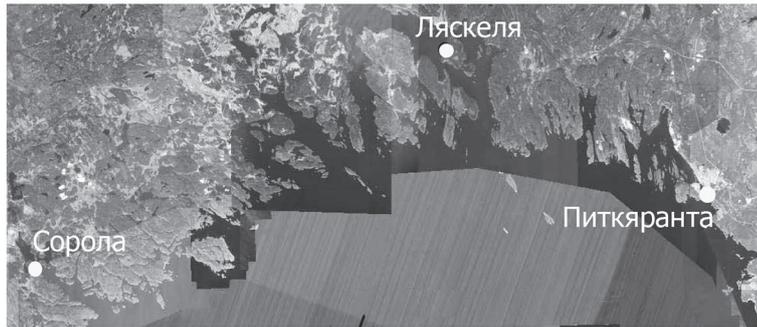


Рис. 2. Местоположение отбора образцов *P. amphibia* в Ладожском озере: у г. Питкяранта, пос. Сорола, пос. Ляскеля (использованы картографические материалы с сайта: <https://yandex.ru/maps>)

Fig. 2. Location of sampling of *P. amphibia* in Lake Ladoga: near Pitkyaranta, Sorola, Lyaskelya (cartographic materials used from the site: <https://yandex.ru/maps>)

чались единичные куртины рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.), частухи подорожниковой (*Alisma plantago-aquatica* L.) и сусака зонтичного (*Butomus umbellatus* L.), а также пятна зарослей ежеголовника всплывающего (*Sparganium emersum* Rehm.). Погруженные растения были представлены мозаичным комплексом – рдестами злаковым (*Potamogeton gramineus* L.) и пронзеннолистным (*Potamogeton perfoliatus* L.), элодеей

канадской (*Elodea canadensis* Michx.), урутью колосистой (*Myriophyllum spicatum* L.) и болотником обоеполым (*Callitriche hermaphrodita* L.). На дне между погруженными растениями часто встречались дерновины ситняка игольчатого (*Eleocharis acicularis* (L.) Roem. et Schult.) и ситняка маленького (*Eleocharis parvula* (Roem. & Schult.) Link ex Bluff, Nees & Schauer). Горец земноводный произрастал в пределах этого

Таблица 1. Средние значения (медиана) некоторых основных показателей состояния водной среды местообитаний *P. amphibia* в Ладожском озере в период исследований (июль 2014 г.) и координаты точек отбора
 Table 1. Average values (median) of some basic indicators of the aquatic environment state in habitats of *P. amphibia* in Lake Ladoga during the study period (July 2014) and the coordinates of the sampling points

Показатели Indicators	Питкяранта Pitkyaranta	Сорола Sorola	Ляскеля Lyaskelya
Температура, °C Temperature, °C	27,0	23,1	24,3
Электропроводность, мСм/см Conductivity, mS/cm	0,138	0,094	0,072
Общая минерализация, г/л Total Dissolved Solids, g/l	0,086	0,063	0,047
Концентрация кислорода, мг/л (% насыщения) Oxygen concentration, mg/l (% saturation)	11,59 (144,7)	9,16 (107,2)	9,14 (109,4)
pH	8,63	7,70	7,56
Концентрация аммонийного азота (NH ₄ ⁺ , мг/л) Ammonium nitrogen concentration (NH ₄ ⁺ , mg/l)	0,10	0,20	0,19
Концентрация нитратного азота (NO ₃ ⁻ , мг/л) Nitrate concentration (NO ₃ ⁻ , mg/l)	2,86	4,41	3,00
Концентрация хлоридов (Cl ⁻ , мг/л) Chloride concentration (Cl ⁻ , mg/l)	0,81	0,67	0,42
Концентрация фикоцианинсодержащих водорослей, кл/мл Concentration of phycocyanin-containing algae, cells/ml	1230	2260	1030
Концентрация хлорофилла <i>a</i> , мкг/л Chlorophyll- <i>a</i> concentration, µg/l	6,6	4,0	3,2
Мутность, NTU Turbidity, NTU	3,4	3,8	1,0
Координаты точек отбора <i>P. amphibia</i> Coordinates of the sampling points of <i>P. amphibia</i>	N61°33.954', E31°28.040'	N61°29.159', E30°13.816'	N61°42.415', E31°00.037'

литорального биотопа небольшими пятнами. Несмотря на то что данный биотоп находится в непосредственной близости от Питкярантского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК), отрицательное воздействие завода на биотоп, по-видимому, минимально, т. к. стоки завода в эту зону не поступают. В то же время, по-видимому, биотоп подвержен серьезной биогенной нагрузке со стороны окружающих его домов, о чем свидетельствуют значительное развитие водной растительности (очень заросшая литораль – 80–85 %), высокие значения pH (8,63) и концентрации кислорода (144,7 % насыщения) вследствие интенсивно протекающих продукционных процессов (табл. 1).

Станция «Сорола». В районе пос. Сорола дно в месте отбора было глинистое с дерновиной из корней тростника. *P. amphibia* произрастал рядом с зарослями тростника южного. В разрывах тростниковых зарослей расположены изреженные заросли хвоща приречного и ситняка болотного (*Eleocharis palustris* (L.) Roem. et Schult.). К ним примешивались куртины тростянки овсяничной (*Scolochloa festucacea* (Willd.) Link) и манника наплывающего (*Glyceria fluitans* (L.) R. Br.), а также встречались пятна за-

рослей ежеголовника всплывающего и стрелолиста обыкновенного (*Sagittaria sagittifolia* L.). Пояс погруженной растительности был представлен мозаичными зарослями рдеста злакового и пронзеннолистного; в прибрежной зоне встречался полушник озерный (*Isoetes lacustris* L.). Литораль в данном местообитании *P. amphibia* может быть охарактеризована как сильно заросшая (степень зарастания 60–65 %).

Станция «Ляскеля». Местообитание в районе пос. Ляскеля располагалось рядом с устьем реки Янисйоки, по которой в залив в недавнем прошлом попадали загрязняющие стоки Ляскельского бумажного завода и деревообрабатывающих производств. Это привело к сильной деградации водной растительности из-за токсического загрязнения.

В 2006 г. в этом месте из макрофитов обнаружен только сильно угнетенный тростник (*P. australis*). Степень зарастания литорали не превышала 6–8 %. В 2014 г. уже наблюдалось заметное улучшение экологической обстановки в заливе в связи с закрытием и реконструкцией ряда производств, отмечалось значительное развитие разнообразной водной растительности в восстанавливаемом ме-

стообитании (степень зарастания 60–65 %, сильно заросшая литораль), в том числе и горца земноводного. Мелкопесчаная литораль с каменистым берегом и пологим уклоном дна в этом месте имела мозаичный характер расположения зарослей гелофитов, погруженных и плавающих растений. Отдельно стоящие куртины тростника и ситняка болотного образовывали прерывистую полосу гелофитов. Между ними отдельными пятнами располагались плавающие растения – ежеголовник узколистный (*Sparganium angustifolium* Michx.), стрелолист плавающий (*S. natans* Pall.) и горец земноводный. Подводный ярус был образован рдестом пронзеннолистным, урутью очередноцветковой (*Myriophyllum alterniflorum* DC.) и шелковником дихотомическим (*Batrachium dichotomum* (Schmalh.) Trautv.), отдельные растения которых были разбросаны по всему мелководью. С глубиной их сменяли монодоминантные заросли рдеста пронзеннолистного.

Исследованные местообитания отличались по общей минерализации, которая была наибольшей на участке акватории озера у г. Питкяранта (табл. 1). Здесь же выявлены более высокие показатели хлорофилла и в 2 раза более низкая концентрация аммонийного азота, чем в других местообитаниях, что объясняется его потреблением интенсивно продуцирующей биотой (растения и бактерии). Эти данные свидетельствуют, что местообитание у г. Питкяранта имело наиболее высокий трофический статус.

Методы исследования

Собранные образцы растений сушили без доступа прямых солнечных лучей до воздушно-сухого состояния. Эфирное масло, содержащее НОС, из высушенных растений получали методом гидродистилляции с использованием аппарата Клевенджера не ранее чем через 3 месяца после сбора [ГОСТ 24027.2-80]. Перед перегонкой высушенный растительный материал измельчали в блендере Waring BB-25ES (Waring, США). При гидродистилляции использовали навески сухого сырья 16–20 г. Полученный дистиллят экстрагировали гексаном. Экстракты до хромато-масс-спектрометрического анализа сохраняли в морозильной камере при температуре –18 °С.

Состав НОС *P. amphibia* выявляли в гексановых экстрактах на хромато-масс-спектрометрическом комплексе TRACE DSQ II (Thermo Electron Corporation) с квадрупольным масс-анализатором. Использовали колонку Thermo TR-5ms SQC 15 м × 0,25 мм с фазой ID 0,25 мкм. Газоносителем был гелий. Масс-спектры регистри-

ровали в режиме сканирования по полному диапазону масс (30–580 m/z) в программированном режиме температур (35° – 3 мин, 2°/мин до 60° – 3 мин, 2°/мин до 80° – 3 мин, 4°/мин до 120° – 3 мин, 5°/мин до 150° – 3 мин, 15°/мин до 240° – 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, рассчитанные по методу: [Ткачев, 2008] с использованием стандартов алканов C₇–C₃₀. Количественный анализ выполняли с использованием декафторбензофенона и бензофенона в качестве внутренних стандартов.

Сходство образцов эфирного масла по качественному составу НОС оценивали с помощью коэффициентов сходства Жаккара (*J*) [Jaccard, 1901] и Съёренсена – Чекановского (*Qs*) [Czekanowski, 1922; Sorensen, 1948], рассчитанных по следующим формулам:

$$J = \frac{c}{a+b-c}, Qs = \frac{2c}{a+b},$$

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

Для оценки сходства образцов по количественным данным (по содержанию отдельных соединений и групп соединений) использовали индекс Мориситы – Хорна [Morisita, 1959]:

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

где *a_i* – содержание *i*-го соединения (группы соединений) в образце А; *b_i* – то же для образца В; *aN* – суммарное содержание НОС в образце А; *bN* – то же для образца В; *da* = Σ(*a_i*²) / *aN*², *db* = Σ(*b_i*²) / *bN*².

Результаты и обсуждение

Исследование компонентного состава НМ горца земноводного из Ладожского озера показало наличие значительного числа НОС (124), принадлежащих к разным классам химических соединений (табл. 2 и 3), из которых 14 соединений остались неидентифицированными.

Изученные образцы горца из разных мест обитания отличались как по числу выявленных НОС, так и по их содержанию. В образцах из местообитаний у г. Питкяранта и п. Сороча НМ горца земноводного содержал близкое число соединений – 107 и 110. Суммарная концентрация НОС в биомассе растений

Таблица 2. Компонентный состав эфирного масла *P. amphibia* из разнотипных местообитаний в Ладожском озере

Table 2. Component composition of essential oil of *P. amphibia* from different types of habitats in Lake Ladoga

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
1	3-гексанон 3-hexanone	C ₆ H ₁₂ O	790	0,32	0,71	-
2	2-гексанон 2-hexanone	C₆H₁₂O	793	1,13	1,62	-
3	гексаналь hexanal	C₆H₁₂O	799	3,93	3,91	4,28
4	гексан-2-ол hexan-2-ol	C ₆ H ₁₄ O	801	0,40	0,44	-
5	(E)-гекс-2-еналь (E)-hex-2-enal	C₆H₁₀O	843	1,74	1,56	3,02
6	1,2-диметилбензен 1,2-dimethylbenzene	C ₈ H ₁₀	857	0,15	0,15	0,30
7	гексан-1-ол hexan-1-ol	C ₆ H ₁₄ O	868	0,10	0,18	0,14
8	1,3-диметилбензен 1,3-dimethylbenzene	C ₈ H ₁₀	883	0,10	0,14	0,10
9	гептан-2-он heptan-2-one	C ₇ H ₁₄ O	891	0,10	0,11	0,13
10	нонан nonane	C ₉ H ₂₀	898	0,14	0,16	0,19
11	гептаналь heptanal	C ₇ H ₁₄ O	900	0,43	0,74	0,77
12	оксолан-2-илметанол oxolan-2-ylmethanol	C ₅ H ₁₀ O ₂	913	0,12	0,19	-
13	бензальдегид benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	950	0,39	0,98	0,61
14	2-гидропероксигексан 2-hydroperoxyhexane	C ₆ H ₁₄ O ₂	961	-	0,17	-
15	1-циклогексилэтанон 1-cyclohexylethanone	C ₈ H ₁₄ O	967	0,30	0,71	-
16	окт-1-ен-3-ол oct-1-en-3-ol	C ₈ H ₁₆ O	979	0,09	0,17	0,22
17	2-метилоктан-3-он 2-methyloctan-3-one	C ₉ H ₁₈ O	984	0,20	0,18	0,60
18	2-пентилфуран 2-pentylfuran	C₉H₁₄O	987	0,28	0,42	1,03
19	2-метилгепт-6-ен-1-ол 2-methylhept-6-en-1-ol	C ₈ H ₁₆ O	996	0,06	0,25	-
20	4-этилциклогексан-1-ол 4-ethylcyclohexan-1-ol	C ₈ H ₁₆ O	998	0,26	-	0,65
21	2-[(E)-пент-2-енил]фуран 2-[(E)-pent-2-enyl]furan	C ₈ H ₁₆ O	998	-	0,35	0,77
22	октаналь octanal	C ₈ H ₁₆ O	1003	0,10	0,36	0,64
23	(2E,4E)-гепта-2,4-диеналь (2E,4E)-hepta-2,4-dienal	C ₇ H ₁₀ O	1009	0,37	0,47	0,66
24	1-метил-3-пропан-2-илбензен; [m-цимен] 1-methyl-3-propan-2-ylbenzene; [m-cymene]	C ₁₀ H ₁₄	1014	0,06	0,11	0,15
25	1-метил-4-пропан-2-илбензен; [p-цимен] 1-methyl-4-propan-2-ylbenzene; [p-cymene]	C ₁₀ H ₁₄	1017	-	-	0,32
26	(4S)-1-метил-4-проп-1-ен-2-илциклогексен; [β-лимонен] (4S)-1-methyl-4-prop-1-en-2-ylcyclohexene [β-limonene]	C ₁₀ H ₁₆	1020	0,16	0,24	0,38
27	2,2,6-триметилциклогексан-1-он 2,2,6-trimethylcyclohexan-1-one	C ₉ H ₁₆ O	1025	0,14	0,15	0,25

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
28	октан-1-амин octan-1-amine	C ₈ H ₁₉ N	1032	0,05	0,04	-
29	2-фенилацетальдегид 2-phenylacetaldehyde	C ₈ H ₈ O	1037	0,06	0,18	0,07
30	(3E,5E)-окта-3,5-диен-2-он (3E,5E)-octa-3,5-dien-2-one	C₈H₁₄O	1039	0,32	1,01	0,58
31	4-метилиден-1-пропан-2-илбицикло[3.1.0]гексан; [сабинен] 4-methylidene-1-propan-2-ylbicyclo[3.1.0]hexane; [sabenene]	C ₁₀ H ₁₆	1051	-	-	0,24
32	3,6,6-триметилциклогекс-2-ен-1-он 3,6,6-trimethylcyclohex-2-en-1-one	C ₉ H ₁₄ O	1052	0,05	0,11	-
33	(E)-окт-2-еналь (E)-oct-2-enal	C ₈ H ₁₄ O	1056	0,26	0,33	0,21
34	Неидентифицированное m/z 134 [M+], 44 (100)		1069	0,08	0,06	-
35	Неидентифицированное m/z 134 [M+], 57 (100)	C ₈ H ₁₂ O ₃	1076	0,06	0,08	-
36	Неидентифицированное m/z? [M+], 57 (100)	C ₅ H ₁₂ N ₂	1079	0,13	-	-
37	3,7-диметилукта-1,6-диен-3-ол; [β-линалоол] 3,7-dimethylocta-1,6-dien-3-ol; [β-linalool]	C ₁₀ H ₁₈ O	1100	0,23	0,37	0,37
38	нонаналь nonanal	C ₉ H ₁₈ O	1104	0,43	0,97	0,97
39	1,7,7-триметилбицикло[2.2.1]гептан-2-он; [камфора] 1,7,7-trimethylbicyclo[2.2.1]heptan-2-one; [camphor]	C ₁₀ H ₁₆ O	1128	0,11	-	-
40	2,6,6-триметилциклогекс-2-ен-1,4-дион; [4-кетоизофорон] 2,6,6-trimethylcyclohex-2-ene-1,4-dione; [4-ketoisophorone]	C ₉ H ₁₂ O ₂	1137	-	0,19	-
41	2-ноненаль 2-nonenal	C ₉ H ₁₆ O	1158	0,12	0,13	0,58
42	нафтален naphthalene	C ₁₀ H ₈	1163	0,16	0,42	-
43	2,6,6-триметилциклогекса-1,3-диен-1-карбальдегид; [сафраналь] 2,6,6-trimethylcyclohexa-1,3-diene-1-carbaldehyde; [safranal]	C ₁₀ H ₁₄ O	1189	0,43	0,51	0,50
44	додекан dodecane	C ₁₂ H ₂₆	1200	0,36	0,35	0,34
45	Неидентифицированное m/z 194 [M+], 112 (100)		1202	1,16	0,26	0,33
46	1,3-бензотиазол 1,3-benzothiazole	C₇H₅NS	1209	0,97	2,09	1,23
47	Неидентифицированное m/z 194 [M+], 112 (100) (изомер)		1221	0,10	-	-
48	3,7-диметилукт-6-ен-1-ол; [β-цитронеллол] 3,7-dimethyloct-6-en-1-ol; [β-citronellol]	C ₁₀ H ₂₀ O	1238	0,16	0,41	-
49	2-(2,6,6-триметициклогексен-1-ил)ацетальдегид 2-(2,6,6-trimethylcyclohexen-1-yl)acetaldehyde	C ₁₁ H ₁₈ O	1245	0,06	0,06	-
50	цис-3,7-диметилукта-2,6-диен-1-ол; [β-нерол] (2Z)-3,7-dimethylocta-2,6-dien-1-ol; [β-nerol]	C ₁₀ H ₁₈ O	1262	0,64	0,78	0,44
51	2-метилнафтален 2-methylnaphthalene	C ₁₁ H ₁₀	1269	0,16	0,12	0,16
52	2-метил-5-пропан-2-илфенол; [карвакрол] 2-methyl-5-propan-2-ylphenol; [carvacrol]	C ₁₀ H ₁₄ O	1300	-	-	0,41
53	5-метил-2-пропан-2-илфенол; [тимол] 5-methyl-2-propan-2-ylphenol; [thymol]	C ₁₀ H ₁₄ O	1311	-	-	0,89
54	(2E,4E)-дека-2,4-диеналь (2E,4E)-deca-2,4-dienal	C ₁₀ H ₁₆ O	1318	0,12	0,25	0,57

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
55	1,1,6-триметил-2Н-нафтален 1,1,6-trimethyl-2H-naphthalene	C ₁₃ H ₁₆	1341	-	0,15	0,33
56	1-трет-бутил-3-метил-5-пропан-2-илбензен 1-tert-butyl-3-methyl-5-propan-2-ylbenzene	C ₁₄ H ₂₂	1362	-	0,06	-
57	Неидентифицированное m/z 148 [M+], 107 (100)		1367	0,47	-	0,76
58	(E)-ундец-2-еналь (E)-undec-2-enal	C ₁₁ H ₂₀ O	1368	-	0,17	-
59	тетрадекан tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	1400	0,50	0,65	0,58
60	(E)-4-(2,4,4-триметилциклогекса-1,5-диен-1-ил)бут-3-ен-2-он (E)-4-(2,4,4-trimethylcyclohexa-1,5-dien-1-yl)but-3-en-2-one	C ₁₃ H ₁₈ O	1424	0,13	0,53	0,76
61	1-метил-4-(6-метилгептан-2-ил)бензен 1-methyl-4-(6-methylheptan-2-yl)benzene	C ₁₅ H ₂₄	1440	0,21	0,09	-
62	2-(2,6-диметилгепт-6-ен-2-ил)-5-метилфуран 2-(2,6-dimethylhept-6-en-2-yl)-5-methylfuran	C ₁₄ H ₂₂ O	1448	0,04	0,16	0,09
63	(5E)-6,10-диметилундека-5,9-диен-2-он; [геранилацетон] (5E)-6,10-dimethylundeca-5,9-dien-2-one; [geranyl acetone]	C ₁₃ H ₂₂ O	1453	-	0,51	-
64	Неидентифицированное m/z 178 [M+], 137 (100)		1454	0,68	-	0,91
65	7-этокси-4-метилхромен-2-он 7-ethoxy-4-methylchromen-2-one	C ₁₂ H ₁₂ O ₃	1464	-	0,18	-
66	Неидентифицированное m/z 183 [M+], 71 (100)		1465	0,12	-	0,13
67	8а-метил-4-метилен-6-пропан-2-илиден-2,3,4а,5,7,8-гексагидро-1Н-нафтален 8a-methyl-4-methyldiene-6-propan-2-ylidene-2,3,4a,5,7,8-hexahydro-1H-naphthalene	C ₁₅ H ₂₄	1469	-	0,23	-
68	2,6-дитрет-бутил-4-гидрокси-4-метилциклогекса-2,5-диен-1-он 2,6-ditert-butyl-4-hydroxy-4-methylcyclohexa-2,5-dien-1-one	C ₁₅ H ₂₄ O ₂	1470	0,03	0,12	0,16
69	(E)-4-(2,6,6-триметилциклогексен-1-ил)бут-3-ен-2-он; [β-ионон] (E)-4-(2,6,6-trimethylcyclohexen-1-yl)but-3-en-2-one; [β-ionone]	C₁₃H₂₀O	1478	0,53	1,06	0,79
70	1,1,2,6-тетраметил-1,2-дигидронафтален 1,1,2,6-tetramethyl-1,2-dihydronaphthalene	C ₁₄ H ₁₈	1493	0,13	0,04	-
71	пентадекан pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	1500	0,14	0,22	0,17
72	2,4-дитрет-бутилфенол 2,4-ditert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O	1512	0,25	0,34	0,18
73	8а-метил-3,4,4а,5,6,7-гексагидро-2Н-нафталин-1,8-дион 8a-methyl-3,4,4a,5,6,7-hexahydro-2H-naphthalene-1,8-dione	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	1514	0,43	0,66	0,41
74	1,4,5-триметилнафтален 1,4,5-trimethylnaphthalene	C ₁₃ H ₁₄	1535	0,05	0,06	-
75	3-метилпентадекан 3-methylpentadecane	C ₁₆ H ₃₄	1565	0,06	0,09	-
76	додекановая кислота dodecanoic acid	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	1589	0,77	1,78	1,03
77	гексадекан hexadecane	C₁₆H₃₄	1600	1,12	0,65	1,12

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
78	(1S,4aR,7R,8aR)-1,4a-диметил-7-(проп-1-ен-2-ил)декагидронафтален-1-ол (1S,4aR,7R,8aR)-1,4a-dimethyl-7-(prop-1-en-2-yl)decahydronaphthalen-1-ol	$C_{15}H_{26}O$	1640	-	0,38	-
79	Неидентифицированное m/z? [M+], 57 (100)		1651	0,23	0,10	0,26
80	трибутилфосфат tributylphosphat;	$C_{12}H_{27}O_4P$	1664	-	0,35	-
81	1,1-ditolyethane 4,4'-(этан-1,1-диил)бис(метилбензен) 4,4'-(ethane-1,1-diyl)bis(methylbenzene)	$C_{16}H_{18}$	1666	0,19	-	0,17
82	4-(2,6,6-триметилциклогексен-1-ил)бутановая кислота 4-(2,6,6-trimethylcyclohexen-1-yl)butanoic acid	$C_{13}H_{22}O_2$	1674	0,18	0,19	0,15
83	(E)-гептадец-1-ен (E)-heptadec-1-ene	$C_{17}H_{34}$	1678	0,18	0,40	0,19
84	1-метокси-4-(4-метилгекс-1-ен-2-ил)бензен 1-methoxy-4-(4-methylhex-1-en-2-yl)benzene	$C_{14}H_{20}O$	1684	0,04	0,06	-
85	Неидентифицированное m/z? [M+], 97 (100)		1686	0,08	0,04	0,14
86	гептадекан heptadecane	$C_{17}H_{36}$	1700	0,90	0,31	0,64
87	4a-метил-4,4a,9,10-тетрагидрофенантрен-2(3H)-он 4a-methyl-4,4a,9,10-tetrahydrophenanthren-2(3H)-one	$C_{15}H_{16}O$	1705	-	0,32	-
88	Неидентифицированное m/z 220 [M+], 149 (100)		1712	0,23	0,34	0,22
89	фенантрен phenanthrene	$C_{14}H_{10}$	1743	0,21	0,50	0,22
90	2,6-дитрет-бутил-4-этилфенол 2,6-ditert-butyl-4-ethylphenol	$C_{16}H_{26}O$	1750	0,26	0,36	0,24
91	(2E)-2-(4,7-диметил-3,4,4a,5,6,8a-гексагидро-2H-нафтален-1-илиден)пропан-1-ол (2E)-2-(4,7-dimethyl-3,4,4a,5,6,8a-hexahydro-2H-naphthalen-1-ylidene)propan-1-ol	$C_{15}H_{24}O$	1761	0,09	0,78	0,05
92	Неидентифицированное m/z? [M+], 57 (100)		1769	0,06	0,35	0,07
93	тетрадекановая кислота tetradecanoic acid	$C_{14}H_{28}O_2$	1778	4,43	8,33	3,24
94	Неидентифицированное m/z 248 [M+], 233 (100)		1808	0,04	-	-
95	Неидентифицированное m/z? [M+], 82 (100)		1815	0,05	0,14	-
96	5-[4-(2-метилпропил)фенил]-1,2-дигидропиразол-3-он 5-[4-(2-methylpropyl)phenyl]-1,2-dihydropyrazol-3-one	$C_{13}H_{16}N_2O$	1822	-	0,13	-
97	6,10,14-триметилпентадекан-2-он; [фитон] 6,10,14-trimethylpentadecan-2-one; [phytone]	$C_{18}H_{36}O$	1847	2,32	5,23	2,90
98	пентадекановая кислота pentadecanoic acid	$C_{15}H_{30}O_2$	1884	0,99	1,74	0,92
99	нонадекан nonadecane	$C_{19}H_{40}$	1900	0,07	0,10	0,14
100	7,9-дитрет-бутил-1-оксаспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-дион 7,9-ditert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-diene-2,8-dione	$C_{17}H_{24}O_3$	1910	0,10	0,17	0,09
101	(5E,9E)-6,10,14-триметилпентадека-5,9,13-триен-2-он (5E,9E)-6,10,14-trimethylpentadeca-5,9,13-trien-2-one	$C_{18}H_{30}O$	1916	0,69	0,77	0,91
102	метилгексадеканоат methylhexadecanoate	$C_{17}H_{34}O_2$	1931	0,05	0,31	0,10
103	3,7,11,15-тетраметилгексадец-1-ен-3-ол; [изофитол] 3,7,11,15-tetramethylhexadec-1-en-3-ol; [isophytol]	$C_{20}H_{40}O$	1952	0,36	0,97	0,43

Продолжение табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
104	цис-9-гексадеценовая кислота cis-9-hexadecenoic acid	C₁₆H₃₀O₂	1961	1,53	5,43	0,77
105	гексадекановая кислота hexadecanoic acid	C₁₆H₃₂O₂	1988	42,53	23,39	29,46
106	(3R)-5-[(1S,4aS,8aS)-5,5,8a-триметил-2-метилен-3,4,4a,6,7,8-гексагидро-1H-нафтаден-1-ил]-3-метилпент-1-ен-3-ол; [маноол] (3R)-5-[(1S,4aS,8aS)-5,5,8a-trimethyl-2-methylidene-3,4,4a,6,7,8-hexahydro-1H-naphthalen-1-yl]-3-methylpent-1-en-3-ol; [manool]	C ₂₀ H ₃₄ O	2044	0,90	0,27	0,82
107	5-циклогексен-1-ил-5-этил-1,3-дiazинан-2,4,6-трион; [циклобарбитал] 5-cyclohexen-1-yl-5-ethyl-1,3-diazinane-2,4,6-trione; [cyclobarbitol]	C ₁₂ H ₁₆ N ₂ O ₃	2063	0,66	0,89	0,57
108	генэйкозан heneicosane	C₂₁H₄₄	2100	1,74	1,08	2,01
109	3,7,11,15-тетраметилгексадец-2-ен-1-ол; [фитол] (E,7R,11R)-3,7,11,15-tetramethylhexadec-2-en-1-ol; [phytol]	C₂₀H₄₀O	2120	2,10	2,25	4,14
110	(9Z,12Z)-октадека-9,12-диеновая кислота; [линолевая кислота] (9Z,12Z)-octadeca-9,12-dienoic acid; [linoleic acid]	C₁₈H₃₂O₂	2144	3,89	4,33	5,48
111	(9Z,12Z,15Z)-октадека-9,12,15-триеновая кислота; [α-линоленовая кислота] (9Z,12Z,15Z)-octadeca-9,12,15-trienoic acid; [α-linolenic acid]	C₁₈H₃₀O₂	2150	6,32	4,88	10,43
112	1-метил-7-пропан-2-илфенантрен; [ретен] 1-methyl-7-propan-2-ylphenanthrene; [retene]	C₁₈H₁₈	2199	1,00	0,46	-
113	эйкозаналь eicosanal	C ₂₀ H ₄₀ O	2224	0,40	0,54	0,69
114	трикозан tricosane	C₂₃H₄₈	2300	2,22	0,97	1,91
115	(E)-8-(2,5,5,8a-тетраметил-1,4,4a,6,7,8-гексагидронафтаден-1-ил)-6-метилокт-5-ен-2-ол (E)-8-(2,5,5,8a-tetramethyl-1,4,4a,6,7,8-hexahydronaphthalen-1-yl)-6-methyloct-5-en-2-ol	C ₂₃ H ₄₀ O	2328	0,23	0,43	0,12
116	5-метил-5-(4,8,12-триметилтридецил)оксолан-2-он 5-methyl-5-(4,8,12-trimethyltridecyl)oxolan-2-one	C ₂₁ H ₄₀ O ₂	2352	0,18	0,31	0,13
117	[(2E,6E,10E)-3,7,11,15-тетраметилгексадека-2,6,10,14-тетраенил]ацетат [(2E,6E,10E)-3,7,11,15-tetramethylhexadeca-2,6,10,14-tetraenyl]acetate	C ₂₂ H ₃₆ O ₂	2383	0,08	0,10	0,09
118	тетракозан tetracosane	C ₂₄ H ₅₀	2400	0,12	-	0,10
119	докозаналь docosanal	C ₂₂ H ₄₄ O	2427	0,08	0,15	0,40
120	1-докозанол 1-docosanol	C ₂₂ H ₄₆ O	2459	0,19	0,14	0,10
121	пентакозан pentacosane	C ₂₅ H ₅₂	2500	0,28	0,18	0,61
122	3-этилпентакозан 3-ethylpentacosane	C ₂₇ H ₅₆	2660	0,27	0,16	-
123	гептакозан heptacosane	C ₂₇ H ₅₆	2700	0,16	0,09	-

Окончание табл. 2

Table 2 (continued)

№	Вещество Compound	Формула Formula	RI	Питкяранта Pitkyaranta, %	Сорола Sorola, %	Ляскеля Lyaskelya, %
124	(6E, 10E, 14E, 18E)-2,6, 10, 15, 19, 23-гексаметилтетракоза-2,6, 10, 14, 18, 22-гексаен; [сквален] (6E, 10E, 14E, 18E)-2,6, 10, 15, 19, 23-hexamethyltetracos-2,6, 10, 14, 18, 22-hexaene; [squalene]	$C_{30}H_{50}$	2823	0,42	0,70	0,60
Всего соединений / общих Total compounds / common				107/75	110/75	87/75
Всего мажорных соединений / общих Total major compounds / common				15/9	16/9	14/9
Доля мажорных соединений, % The proportion of the major compounds, %				77,16	69,70	71,27
Доля общих мажорных соединений, % The proportion of common major compounds, %				68,99	54,96	64,96
Мажорные соединения, мкг/г сухой массы растения Major compounds, µg/g dry weight of the plant				98,79	102,49	29,53
ВСЕГО: С, мкг/г сухой массы растения TOTAL: C, µg/g dry weight of the plant				128,03	147,03	41,43

Примечание. RI – индекс удерживания; % – процентное содержание вещества от суммы всех веществ эфирного масла; С – абсолютное содержание веществ. Для некоторых соединений в квадратных скобках указаны тривиальные или наиболее часто употребляемые наименования. Полу жирным выделены мажорные соединения, доля которых (хотя бы для одного образца) превышала 1 %. Прочерк означает отсутствие компонента.

Note. RI – retention index; % – the percentage of the substance of the sum of all essential oil substances; C – the absolute content of substances. Trivial or most commonly used names are given in square brackets for some compounds; major compounds (the proportion of which for at least one sample exceeded 1 %) are highlighted in bold; a dash indicates the absence of a component.

также отличалась незначительно – 128,03 и 147,03 мкг/г сух. м. В образце же *P. amphibia* из шхер у п. Ляскеля было обнаружено всего 87 НОС, а их суммарное содержание составило лишь 41,43 мкг/г сух. м., что в 3–3,5 раза ниже, чем в двух других местообитаниях. Вероятнее всего, это связано с фактом интенсивного загрязнения данного местообитания в недавнем прошлом стоками деревообрабатывающих производств (в настоящее время закрытых или реконструированных). Возможно, менее интенсивное загрязнение сохраняется и по сей день. Известно, что у наземных растений уменьшается количество и снижается качество эфирного масла при увеличении антропогенного воздействия и ухудшении условий произрастания [Сотникова, Степень, 2001; Степень, Есякова, 2007; Марчук, Ежов, 2011; Тихонова и др., 2012; Опекунова и др., 2013]. По-видимому, данная закономерность характерна и для водных растений.

При сравнении содержания основных групп соединений в образцах горца земноводного из разных мест обитания в Ладожском озере (табл. 3) оказалось, что среди НОС из всех образцов *P. amphibia* наиболее обильной группой были жирные кислоты (50,1–60,6 %).

Значительная доля суммарного содержания НОС приходилась на альдегиды, углеводороды и кетоны (табл. 3). Заметного преобладания ка-

кой-либо группы НОС в популяции горца из местообитания с повышенным антропогенным воздействием (Ляскеля) не выявлено. Можно только отметить отсутствие азотсодержащих и фосфорсодержащих соединений у *P. amphibia* из данного биотопа в Ладожском озере.

Оценка сходства компонентного состава эфирных масел образцов *P. amphibia* в целом показала высокую степень сходства НМ из трех исследованных местообитаний. Когда учитывалось только наличие или отсутствие компонента (сходство по индексам Жаккара и Съеренсена – Чекановского), оказалось, что наиболее сходны были составы НМ горца земноводного, произраставшего у г. Питкяранта и п. Сорола (табл. 4). НМ горца из биотопа, который подвергался токсическому воздействию отходов деревообрабатывающих производств (Ляскеля), характеризовался наименьшим сходством с образцами из двух других биотопов. Если учитывать только мажорные компоненты, то более сходны были НМ горца в парах Питкяранта-Ляскеля и Сорола-Ляскеля и наименее сходны у растений из Питкяранта и Соролы (табл. 4). Похожий результат получен при использовании индекса Мориситы с учетом концентраций всех НОС и мажорных компонентов. Таким образом, мажорные компоненты, на долю которых приходилось от 70 до 77 % содержания в эфирном масле исследованных образцов, оказы-

Таблица 3. Сравнительное содержание (% по отношению к цельному эфирному маслу) и концентрация (С, мкг/г сухой массы растения) основных групп соединений в образцах *P. amphibia* из разнотипных местообитаний в Ладожском озере

Table 3. Comparative content (% in relation to whole essential oil) and concentration (C, µg/g of dry plant mass) of the main groups of compounds in *P. amphibia* samples from different habitats in Lake Ladoga

Группа соединений Chemical group	Питкяранта Pitkyaranta		Сорола Sorola		Ляскеля Lyaskelya	
	%	С	%	С	%	С
жирные кислоты Carboxylic acids	60,63	77,63	50,09	73,64	51,47	21,32
альдегиды Aldehydes	8,92	11,42	11,28	16,59	13,98	5,79
углеводороды Hydrocarbons	8,85	11,33	6,32	9,30	9,21	3,82
кетоны Ketones	6,81	8,72	13,98	20,56	7,49	3,10
спирты Alcohols	5,80	7,42	7,82	11,50	7,47	3,10
неидентифицированные соединения Unidentified compounds	3,49	4,47	1,37	2,01	2,82	1,17
ароматические углеводороды AromaticHydrocarbons	2,68	3,43	2,88	4,24	1,97	0,82
серосодержащие соединения Sulfur-containing compounds	0,97	1,24	2,09	3,08	1,23	0,51
полифункциональные соединения Diverse functional groups	0,88	1,12	1,60	2,35	0,66	0,27
эферы Esters	0,68	0,87	1,70	2,50	2,20	0,91
фенолы Phenols	0,25	0,32	0,34	0,50	1,48	0,61
азотсодержащие соединения Nitrogen-containing compounds	0,05	0,07	0,17	0,25	0,00	0,00
фосфорсодержащие соединения Phosphorus-containing compounds	0,00	0,00	0,35	0,52	0,00	0,00
ВСЕГО TOTAL	100,00	128,03	100,00	147,03	100,00	41,43

Таблица 4. Сходство НМ *P. amphibia* из разных местообитаний в Ладожском озере по индексам сходства Жаккара (J_1 – по всем соединениям, J_2 – по мажорным соединениям), Сьёренсена – Чекановского (Ks_1 – по всем соединениям, Ks_2 – по мажорным соединениям) и по индексу Мориситы – Хорна (Cmh_1 – для групп соединений, Cmh_2 – для всех соединений)

Table 4. The similarity of the low molecular weight metabolome of *P. amphibia* from different habitats in Lake Ladoga according to the Jaccard similarity indices (J_1 for all compounds, J_2 for major compounds), Sorensen-Czekanowski similarity indices (Ks_1 for all compounds, Ks_2 for major compounds) and Morisita-Horn index (Cmh_1 for groups of compounds, Cmh_2 for all compounds)

	J_1	J_2	Ks_1	Ks_2	Cmh_1	Cmh_2
Питкяранта-Сорола Pitkyaranta-Sorola	0,81	0,55	0,89	0,71	0,97	0,84
Питкяранта-Ляскеля Pitkyaranta-Lyaskelya	0,72	0,61	0,84	0,76	0,98	0,93
Сорола-Ляскеля Sorola-Lyaskelya	0,64	0,61	0,78	0,76	0,99	0,92

вали наибольшее влияние на оценку сходства НМ горца из разных местообитаний, если учитывать количественное содержание отдельных НОС в эфирном масле. Наиболее сильные различия между местообитанием с ток-

сическим загрязнением (Ляскеля) и другими местообитаниями получены при использовании индексов Жаккара и Сьёренсена – Чекановского при качественном анализе полного состава НМ.

Таблица 5. Сравнительное содержание (% по отношению к цельному эфирному маслу) соединений, входящих в состав пяти наиболее значимых мажорных компонентов НМ *P. amphibia* (место по значимости указано в скобках)

Table 5. Comparative content (% in relation to whole essential oil) of the compounds included in the 5 most significant major components of the low molecular weight metabolome of *P. amphibia* (the place in importance is indicated in brackets)

	Питкяранта Pitkyaranta	Сорола Sorola	Ляскеля Lyaskelya
гексадекановая кислота hexadecanoic acid	42,53 (1)	23,39 (1)	29,46 (1)
(9Z, 12Z, 15Z)-октадека-9, 12, 15-триеновая кислота; [α-линоленовая кислота] (9Z, 12Z, 15Z)-octadeca-9, 12, 15-trienoic acid; [α-linolenic acid]	6,32 (2)	4,88 (5)	10,43 (2)
тетрадекановая кислота tetradecanoic acid	4,43 (3)	8,33 (2)	-
гексаналь hexanal	3,93 (4)	-	4,28 (4)
(9Z, 12Z)-октадека-9, 12-диеновая кислота; [линолевая кислота] (9Z, 12Z)-octadeca-9, 12-dienoic acid; [linoleic acid]	3,89 (5)	-	5,48 (3)
цис-9-гексадеценная кислота cis-9-hexadecenoic acid	-	5,43 (3)	-
6, 10, 14-триметилпентадекан-2-он 6, 10, 14-trimethylpentadecan-2-one	-	5,23 (4)	-
3, 7, 11, 15-тетраметилгексадец-2-ен-1-ол; [фитол] (E, 7R, 11R)-3, 7, 11, 15-tetramethylhexadec-2-en-1-ol; [phytol]	-	-	4,14 (5)

Примечание. Прочерк означает, что соединение не входит в состав пяти наиболее значимых компонентов.

Note. A dash means that the compound is not part of the 5 most significant components.

В табл. 5 представлены пять наиболее значимых (% по отношению к цельному эфирному маслу) мажорных компонентов НМ исследованных образцов горца земноводного из Ладожского озера. Первое место во всех случаях занимала гексадекановая кислота. Причем в НМ *P. amphibia* из биотопа у г. Питкяранта на ее долю в составе всех компонентов приходилось более 42 %. В образцах из Соролы и Ляскеля ее доля также была значительна – 23,39 и 29,46 % (табл. 5). Следует отметить, что карбоновые кислоты во всех образцах горца занимали лидирующие места: гексадекановая кислота – три первых места, α-линоленовая кислота – два вторых места, тетрадекановая кислота – второе и третье место, линолевая кислота и цис-9-гексадеценная кислота – по одному третьему месту (табл. 5, рис. 3).

Как уже известно, карбоновые кислоты играют значительную роль в водных экосистемах прежде всего как активные аллелохимики [Negazy et al., 2001; Nakai et al., 2005; Hu, Hong, 2008; Sun et al., 2016; Zuo et al., 2016; Kurashov et al., 2018], подавляя развитие планктонных водорослей и цианобактерий.

Такой существенный синтез жирных кислот горцем земноводным указывает на то, что его зачастую очень хорошо развитые ассоциации оказывают значительное воздействие на фитопланктон в литорали Ладожского озера в ходе аллелопатических взаимодействий.

Кроме карбоновых кислот в пятерке наиболее обильных мажорных компонентов были представлены гексаналь (два 4-х места), 6,10,14-триметилпентадекан-2-он (одно 4-е место) и фитол (одно 5-е место) (табл. 5).

Обладающий травяным запахом гексаналь обнаруживается среди летучих НОС у многих наземных [Zhou et al., 2011] и водных [Walsh et al., 1998; Kurashov et al., 2014] растений, а также у грибов [Secondary..., 2008].

У водных растений функциональная роль гексаналя, а также других альдегидов, изучена очень слабо. Однако известно, что они выполняют разнообразные экологические и биологические функции, из которых наиболее важны регуляторная, сигнальная, защитная, отпугивающая и привлекающая [Fall et al., 1999; Hu et al., 2008; Arimura et al., 2009; Watson et al., 2009; Jüttner et al., 2010].

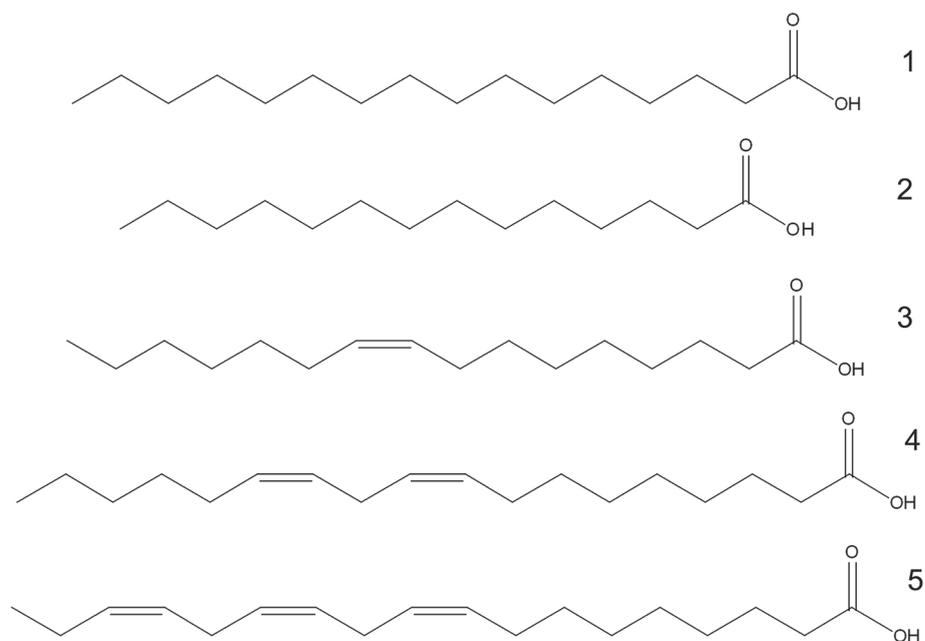


Рис. 3. Наиболее обильные предельные и ненасыщенные карбоновые кислоты в НМ образцов *P. amphibia* в Ладожском озере: 1 – гексадекановая кислота; 2 – тетрадекановая кислота; 3 – цис-9-гексадеценная кислота; 4 – линолевая кислота; 5 – α -линоленовая кислота

Fig. 3. The most abundant saturated and unsaturated fatty acids in low molecular weight metabolome of *P. amphibia* in Lake Ladoga: 1 – hexadecanoic acid; 2 – tetradecanoic acid; 3 – cis-9-hexadecenoic acid; 4 – linoleic acid; 5 – α -linolenic acid

Соединение 6,10,14-триметилпентадекан-2-он может служить индикатором происхождения органического вещества в озерных осадках из сосудистых растений [Wenchuan et al., 1999]. Помимо горца земноводного это биологически активное соединение может входить в состав мажорных НОС также и у других водных макрофитов (например, *Nuphar lutea* (L.) Sm., виды рода *Potamogeton*) [Kurashov et al., 2016]. Однако роль данного соединения в водных экосистемах не изучена.

Помимо упомянутых выше среди мажорных НОС горца земноводного обнаружены и другие интересные биологически активные метаболиты, которые могут оказывать определенное воздействие на сосуществующие с *P. amphibia* виды в озерном гидробиоценозе.

Так, по аналогии с другими индазолами [Chattha et al., 2013], синтезируемый горцем 1,3-бензотиазол может выступать как аллелохемик и ингибировать рост других растений и водорослей. Кроме того, данное соединение обладает выраженной антимикробной активностью [Soni et al., 2010].

Заслуживает внимания обнаружение среди НОС горца земноводного (в двух образцах из трех) такого соединения, как ретен (1-метил-7-пропан-2-илфенантрен). Ретен используется в качестве биомаркера исключительно

хвойных растений при палеогеографических реконструкциях, а его повышенные концентрации связывают с возрастанием доли хвойных растений в составе исходного органического вещества [Остроухов и др., 2013; Бушнев и др., 2016]. До настоящего времени данное соединение не обнаруживалось у водных растений. По последним сведениям, ретен также способен синтезировать глубинные микроорганизмы Байкала и он является биомаркером «молодой» байкальской нефти [Павлова, Букин, 2016].

Таким образом, ретен, по-видимому, не является исключительным индикатором хвойных, а его нахождение в природе может быть связано с функционированием и других организмов.

Заключение

Впервые проведенное хромато-масс-спектрометрическое исследование НМ горца земноводного, произрастающего в разнотипных биотопах Ладожского озера, позволило выявить качественный и количественный компонентный состав НОС его НМ. Обнаружение преобладания карбоновых кислот (50–60 % по содержанию) и других биологически активных НОС свидетельствует о выраженном влиянии данного растения на гидробиоценозы литорали Ладоги. НМ *P. amphibia* из биотопа, в недавнем прош-

лом находившегося под сильным антропогенным воздействием (стоки ЦБК и деревообрабатывающих предприятий), характеризовался наименьшим числом НОС (87 против 107 и 114) и их общим содержанием – в 3–3,5 раза ниже, чем у растений, произрастающих в более благоприятных условиях. Следует признать актуальным дальнейшее изучение НМ *P. amphibia*, в том числе и из других биотопов в Ладожском озере, а также других водоемов, наряду со сравнением водной и наземной форм горца по содержанию НОС для прояснения вопроса о закономерностях изменения его НМ под воздействием природных и антропогенных факторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по темам №№ 0154-2019-0001 и 0154-2019-0002.

Литература

- Бушнев Д. А., Валяева О. В., Котик И. С., Бурдельная Н. С., Бурцев И. Н. Состав биомаркеров битумоидов из углей и вмещающих отложений северо-востока Печорского угольного бассейна // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2016. № 6(258). С. 3–10.
- Горец земноводный // Энциклопедия лекарственных растений [Электронный ресурс]. URL: http://medgrasses.ru/gorez_zemnovodny.html (дата обращения: 04.09.2019).
- ГОСТ 24027.2-80. Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла.
- Гуревич Ф. А. Роль фитонцидов во внутренних водоемах // Водные ресурсы. 1978. № 2. С. 133–142.
- Кашина Л. И., Тупицына Н. Н. Сем. Polygonaceae – гречишные // Флора Сибири. Новосибирск: Наука, 1992. Т. 5. С. 106–108.
- Крылова Ю. В., Курашов Е. А., Митрукова Г. Г. Компонентный состав летучих низкомолекулярных органических соединений *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae), произрастающего в различных климатических условиях // Вода: химия и экология. 2016. № 8. С. 11–25.
- Марчук Н. Ю., Ехов В. Н. Влияние антропогенного загрязнения среды на содержание и состав эфирного масла *Cupressus sempervirens* L. // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. Биология, химия. 2011. Т. 24, № 4. С. 151–155.
- Олекунова М. Г., Крылова Ю. В., Курашов Е. А., Чихачева А. Ю. Изменение качества лекарственных растений *Thymus marschallianus* Willd. и *Salvia steprosa* Schost. под воздействием загрязнения тяжелыми металлами на Южном Урале // Бюллетень Брянского отделения РБО. 2013. № 2. С. 97–112.
- Остроухов С. Б., Цыганкова В. А., Попова П. Ф. Биомаркеры (кадален и ретен) юрско-меловых отложений Северного Каспия и возможности их использования при палеогеографических реконструкциях // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Материалы VII Всерос. литолог. совещ. (Новосибирск, 28–31 окт. 2013 г.). Т. 2. Новосибирск, 2013. С. 356–359.
- Павлова О. Н., Букин С. В. «Пришельцы» Байкала // Наука из первых рук. 2016. № 3(69). С. 50–55.
- Распопов И. М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 197 с.
- Сотникова О. В., Степень Р. А. Эфирные масла сосны как индикатор загрязнения среды // Химия растительного сырья. 2001. № 3. С. 79–84.
- Степень Р. А., Есякова О. А. Влияние антропогенного загрязнения среды на содержание и состав эфирного масла хвои ели // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24, № 1. С. 122–127.
- Тихонова И. В., Анискина А. А., Мухортова Л. В., Лоскутов С. Р. Индивидуальная изменчивость состава летучих выделений хвои сосны обыкновенной в популяциях Хакасии и Тувы // Сибирский экологический журнал. 2012. Т. 19, № 3. С. 397–405.
- Ткачев А. В. Исследование летучих веществ растений. Новосибирск: Офсет, 2008. 969 с.
- Aasim M., Khawar K. M., Ahmed S. I., Karataş M. Multiple uses of some important aquatic and semiaquatic medicinal plants // Plant and Human Health. 2019. Vol. 2. P. 541–577.
- Abbasi A. M., Shah M. H., Khan M. Phytochemical contents of wild edible vegetables // Wild edible vegetables of Lesser Himalayas: Ethnobotanical and nutraceutical aspects. 2015. Vol. 1. P. 237–284. doi: 10.1007/978-3-319-09543-1_7
- Arimura G., Matsui K., Takabayashi J. Chemical and molecular ecology of herbivore – induced plant volatiles: Proximate factors and their ultimate functions // Plant Cell Physiol. 2009. Vol. 50, no. 5. P. 911–923. doi: 10.1093/pcp/pcp030
- Baharum S. N., Azizan K. A. Metabolomics in systems biology // Omics Applications for Systems Biology / Eds. W. M. Aizat et al. Advances in Experimental Medicine and Biology. Vol. 1102. Springer Nature Switzerland AG, 2018. P. 51–68.
- Chattha F. A., Munawar M. A., Nagra S. A., Ashraf M., Khan M. A., Kosur S. Synthesis of 3-Aryl-1H-Indazoles and their effects on plant growth // J. Plant Growth Regulation. 2013. Vol. 32. P. 291–297. doi: 10.1007/s00344-012-9297-1
- Christopher P., Parasuraman S., Christina J. A., Vinkneswaran M., Asmawi M. Z. Review on Polygonum minus. Huds, a commonly used food additive in Southeast Asia // Pharmacognosy Research. 2015. Vol. 7(1). P. 1–6. doi: 10.4103/0974-8490.147125
- Czekanowski J. Coefficient of racial likeness and durchschnittliche Differenz // Anthropol. Anz. 1922. Vol. 9. P. 227–249.
- Duke J. A. Duke's handbook of medicinal plants of Latin America. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 832 p. doi: 10.1201/9781420043174
- Fall R., Karl T., Hansel A., Jordan A., Lindinger W. Volatile organic compounds emitted after leaf wounding: On-line analysis by proton-transfer-reaction mass spec-

- trometry // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104, iss. D13. P. 15963–15974. doi: 10.1029/1999JD900144
- Fink P. Ecological functions of volatile organic compounds in aquatic systems // Mar. Freshwat. Behav. Physiol. 2007. Vol. 40, no. 3. P. 155–168. doi: 10.1080/10236240701602218
- Han P., Huang Y., Xie Y., Yang W., Xiang W., Hylands P. J., Legid-Quigley C. Metabolomics reveals immunomodulation as a possible mechanism for the antibiotic effect of *Persicaria capitata* (Buch.-Ham. ex D. Don) H. Gross // Metabolomics. 2018. Vol. 14, no. 91. P. 1–9. doi: 10.1007/s11306-018-1388-y
- Hao D. C., Gu X.-J., Xiao P. G. Phytochemical and biological research of Polygoneae medicinal resources // Medicinal Plants. Chemistry, Biology and Omics. 2015. P. 465–529. doi: 10.1016/B978-0-08-100085-4.00012-8
- Hegazy A. K., Amer W. M., Khedr A. A. Allelopathic effect of *Nymphaea lotus* L. on growth and yield of cultivated rice around Lake Manzala (Nile Delta) // Hydrobiologia. 2001. Vol. 464. P. 133–142. doi: 10.1023/A:1013943318230
- Hinds H. R., Freeman C. C. *Persicaria* (L.) Mill. // Flora of North America North of Mexico: Magnoliophyta: Caryophyllidae (part 2). Vol. 5 (Flora of North America Editorial Committee, ed.). New York; Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 574–594.
- Hu H., Hong Y. Algal – bloom control by allelopathy of aquatic macrophytes – A review // Front. Environ. Sci. Engin. China. 2008. Vol. 2, no. 4. P. 421–438. doi: 10.1007/s11783-008-0070-4
- Hu Z., Shen Y., Luo Y., Shen F., Gao H., Gao R. Aldehyde volatiles emitted in succession from mechanically damaged leaves of poplar cuttings // J. Plant Biol. 2008. Vol. 51, no. 4. P. 269–275.
- 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. Bd. 140. P. 241–272.
- Jüttner F., Messina P., Patalano C., Zupo V. Odour compounds of the diatom *Cocconeis scutellum*: effects on benthic herbivores living on *Posidonia oceanica* // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2010. Vol. 400. P. 63–73. doi: 10.3354/meps08381
- 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. Article ID 1205680. 9 p. doi: 10.1155/2016/1205680
- Kurashov E. A., Krylova J. V., Mitrukova G. G., Chernova A. M. Low-molecular-weight metabolites of aquatic macrophytes growing on the territory of Russia and their role in hydroecosystems // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7, no. 4. P. 433–448. doi: 10.1134/S1995425514040064
- Kurashov E. A., Mitrukova G. G., Krylova Yu. V. Inter-annual variability of low-molecular metabolite composition in *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae) from a floodplain lake with a changeable trophic status // Contemp. Probl. Ecol. 2018. Vol. 11, no. 2. P. 179–194. doi: 10.1134/S1995425518020063
- Morisita M. Measuring of interspecific association and similarity between communities // Memoires of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology). 1959. No. 3. P. 65–80.
- Nakai S., Yamada S., Hosomi M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum* // Hydrobiologia. 2005. Vol. 543. P. 71–78. doi: 10.1007/s10750-004-6822-7
- Persicaria* // Plants of the world online [Электронный ресурс]. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:60433517-2> (дата обращения: 03.11.2019).
- Prota N., Mumm R., Bouwmeester H. J., Jongsma M. A. Comparison of the chemical composition of three species of smartweed (genus *Persicaria*) with a focus on drimane sesquiterpenoids // Phytochemistry. 2014. Vol. 108. P. 129–136. doi: 10.1016/j.phytochem.2014.10.001
- Rahnamaie-Tajadod R., Goh H.-H., Noor N. M. Methyl jasmonate-induced compositional changes of volatile organic compounds in *Polygonum minus* leaves // J. Plant Physiol. 2019. Vol. 240. Article 152994. doi: 10.1016/j.jplph.2019.152994
- Secondary Metabolites in soil ecology / Ed. P. Karlovsky. Soil Biology. Vol. 14. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 293 p.
- Soni B., Ranawat M. S., Sharma R., Bhandari A., Sharma S. Synthesis and evaluation of some new benzothiazole derivatives as potential antimicrobial agents // Eur. J. Med. Chem. 2010. Vol. 45, no. 7. P. 2938–2942. doi: 10.1016/j.ejmech.2010.03.019
- 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 com – mons // Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Biologiske Skrifter. 1948. Vol. 5. P. 1–34.
- Sun X., Jin H., Zhang L., Hu W., Li Y., Xu N. Screening and isolation of the algicidal compounds from marine green alga *Ulva intestinalis* // Chin. J. Ocean. Limnol. 2016. Vol. 34. P. 781–788. doi: 10.1007/s00343-016-4383-z
- Swapna M. M., Prakashkumar R., Anoop K. P., Manju C. N., Rajith N. P. A review on the medicinal and edible aspects of aquatic and wetland plants of India // J. Med. Plants Res. 2011. Vol. 5, no. 33. P. 7163–7176.
- Volodin V., Chadin I., Whiting P., Dinan L. Screening plants of European North-East Russia for ecdysteroids // Biochem. Syst. Ecol. 2002. Vol. 30. P. 525–578.
- Walsh K., Jones G. J., Dunstan R. H. Effect of high irradiance and iron on volatile odour compounds in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* // Phytochemistry. 1998. Vol. 49, no. 5. P. 1227–1239. doi: 10.1016/S0031-9422(97)00943-6
- Watson S. B., Caldwell G., Pohnert G. Fatty acids and oxylipins as semiochemicals // Lipids in Aquatic Ecosystems. Springer, 2009. P. 65–91.
- Wenchuan Q., Dickman M., Sumin W., Ruijin W., Pingzhong Z., Jianfa C. Evidence for an aquatic plant origin of ketones found in Taihu Lake sediments // Hydrobiologia. 1999. Vol. 397. P. 149–154. doi: 10.1023/A:1003624625076
- Zheng L., Lu Y., Cao X., Huang Y., Liu Y., Tang L., Wang Y.-L. Evaluation of the impact of *Polygonum capitatum*, a traditional Chinese herbal medicine, on rat

hepatic cytochrome P450 enzymes by using a cocktail of probe drugs // J. Ethnopharmacol. 2014. Vol. 158. P. 276–282. doi: 10.1016/j.jep.2014.10.031

Zhou J., Xie G., Yan X. Encyclopedia of traditional Chinese medicines. Molecular structures, pharmacological activities, natural sources and applications. Vol. 6: Indexes. Springer, 2011. 730 p. doi: 10.1007/978-3-642-16744-7

References

Bushnev D. A., Valyaeva O. V., Kotik I. S., Burdel'naya N. S., Burtsev I. N. Sostav biomarkerov bitumoidov iz uglei i vmeshchayushchikh otlozhenii severo-vostoka Pechorskogo ugol'nogo basseina [Composition of biomarkers of bitumen from coal and host deposits of the north-east of the Pechora coal basin]. *Vestnik Inst. geol. Komi nauch. tsentra Ural'skogo otd. RAN* [Bull. Inst. Geol., Komi Sci. Center, Ural Br. RAS]. 2016. No. 6(258). P. 3–10.

GOST 24027.2-80. Syr'e lekarstvennoe rastitel'noe. Metody opredeleniya vlazhnosti, sodержaniya zoly, ekstraktivnykh i dubil'nykh veshchestv, efirnogo masla [GOST 24027.2-80. Herbal raw materials. Methods for determining humidity, ash content, extractive and tannins, essential oils].

Gorets zemnovodnyi [Water smartweed]. *Entsiklopediya lekarstvennykh rastenii* [Encyclopedia of Medicinal Plants]. URL: http://medgrasses.ru/gorez_zemnovodny.html (accessed: 04.09.2019).

Gurevich F. A. Rol' fitontsidov vo vnutrennikh vodoe-makh [The role of phytoncides in inland waters]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1978. No. 2. P. 133–142.

Kashina L. I., Tupitsyna N. N. Sem. Polygonaceae – grechishnye [Polygonaceae – Buckwheat]. *Flora Sibiri* [Siberian Flora]. Novosibirsk, 1992. Vol. 5. P. 106–108.

Krylova J. V., Kurashov E. A., Mitrukova G. G. Komponentnyi sostav letuchikh nizkomolekulyarnykh organicheskikh soedinenii *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae), proizrastayushchego v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh [Component composition of the low molecular weight volatile organic compounds of *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae) growing in different climatic conditions]. *Voda: khimiya i ekol.* [Water: Chemistry and Ecol.]. 2016. No. 8. P. 11–25.

Marchuk N. Yu., Ezhov V. N. Vliyanie antropogennogo zagryazneniya sredy na sodержanie i sostav efirnogo masla *Cupressus sempervires* L. [Influence of anthropogenic pollution of the environment on the content and composition of essential oil of *Cupressus sempervires* L.]. *Uchenye zapiski Tavricheskogo nats. univ. im. V. I. Vernadskogo. Ser. Biol., khimiya* [Proceed. V. I. Vernadsky Taurida National Univ. Ser. Biol. Chem.]. 2011. Vol. 24, no. 4. P. 151–155.

Opekunova M. G., Krylova Yu. V., Kurashov E. A., Chikhacheva A. Yu. Izmenenie kachestva lekarstvennykh rastenii *Thymus marschallianus* Willd. i *Salvia stepposa* Schost. pod vozdeistviem zagryazneniya tyazhelymi metallami na Yuzhnom Urale [Change in the quality of medicinal plants *Thymus marschallianus* Willd. and *Salvia stepposa* Schost. under the influence of heavy metal pollution in the South Urals]. *Byull. Bryanskogo otd. Russ. botanich. obshchestva* [Bull.

Zuo S., Zhou S., Ye L., Ding Y., Jiang X. Antialgal effects of five individual allelochemicals and their mixtures in low level pollution conditions // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. Vol. 23. P. 15703–15711. doi: 10.1007/s11356-016-6770-6

Поступила в редакцию 12.10.2019

Bryansk Br. Russian Botanical Society]. 2013. No. 2. P. 97–112.

Ostroukhov S. B., Tsygankova V. A., Popova P. F. Biomarkery (kadalen i reten) yursko-melovykh otlozhenii Severnogo Kaspiya i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya pri paleogeograficheskikh rekonstruktsiyakh [Biomarkers (cadalene and retene) of Jurassic-Cretaceous deposits of the Northern Caspian and the possibilities of their use in paleogeographic reconstructions]. *Osadochnye basseiny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geol. istorii: Mat. VII Vseros. litolog. soveshch.* (Novosibirsk, 28–31 okt. 2013 g.) [Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation processes in geol. history. Proceed. VII All-Russ. lithol. meeting (Novosibirsk, Oct. 28–31, 2013)]. Novosibirsk, 2013. Vol. 2. P. 356–359.

Pavlova O. N., Bukin S. V. "Prishel'tsy" Baikala ["Aliens" of Lake Baikal]. *Nauka iz pervykh ruk* [First-hand Sci.]. 2016. No. 3(69). P. 50–55.

Raspopov I. M. Vysshaya vodnaya rastitel'nost' bol'shikh ozer Severo-Zapada SSSR [Higher aquatic vegetation of large lakes of the North-West of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1985. 197 p.

Sotnikova O. V., Stepen' R. A. Efirnye masla sosny kak indikator zagryazneniya sredy [Essential oils of pine as an indicator of environmental pollution]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials]. 2001. No. 3. P. 79–84.

Stepen' R. A., Esyakova O. A. Vliyanie antropogennogo zagryazneniya sredy na sodержanie i sostav efirnogo masla khvoi eli [Influence of anthropogenic pollution on the content and composition of pine needles essential oil]. *Khvoinye boreal'noi zony* [Coniferous of the Boreal Zone]. 2007. Vol. 24, no. 1. P. 122–127.

Tikhonova I. V., Aniskina A. A., Mukhortova L. V., Loskutov S. R. Individual variability in the composition of volatile secretions of scots pine needles in populations of Khakassia and Tuva. *Contemp. Probl. Ecol.* 2012. Vol. 5, no. 3. P. 292–299. doi: 10.1134/S1995425512030171

Tkachev A. V. Issledovanie letuchikh veshchestv rastenii [Study of volatile substances of plants]. Novosibirsk: Offset, 2008. 969 p.

Aasim M., Khawar K. M., Ahmed S. I., Karataş M. Multiple uses of some important aquatic and semi-aquatic medicinal plants. *Plant and Human Health.* 2019. Vol. 2. P. 541–577.

Abbasi A. M., Shah M. H., Khan M. Phytochemical contents of wild edible vegetables. *Wild edible vegetables of Lesser Himalayas: Ethnobotanical and nutraceutical aspects.* 2015. Vol. 1. P. 237–284. doi: 10.1007/978-3-319-09543-1_7

- Arimura G., Matsui K., Takabayashi J. Chemical and molecular ecology of herbivore-induced plant volatiles: Proximate factors and their ultimate functions. *Plant Cell Physiol.* 2009. Vol. 50, no. 5. P. 911–923. doi: 10.1093/pcp/pcp030
- Baharum S. N., Azizan K. A. Metabolomics in systems biology. Omics applications for systems biology. Eds. W. M. Aizat et al. *Advances in Experimental Medicine and Biology.* Vol. 1102. Springer Nature Switzerland AG, 2018. P. 51–68.
- Chattha F. A., Munawar M. A., Nagra S. A., Ashraf M., Khan M. A., Kosur S. Synthesis of 3-Aryl-1H-Indazoles and their effects on plant growth. *J. Plant Growth Regulation.* 2013. Vol. 32. P. 291–297. doi: 10.1007/s00344-012-9297-1
- Christopher P., Parasuraman S., Christina J. A., Vigneswaran M., Asmawi M. Z. Review on Polygonum minus. Huds, a commonly used food additive in Southeast Asia. *Pharmacognosy Research.* 2015. Vol. 7(1). P. 1–6. doi: 10.4103/0974-8490.147125
- Czekanowski J. Coefficient of racial likeness and durchschnittliche Differenz. *Anthropol. Anz.* 1922. Vol. 9. P. 227–249.
- Duke J. A. Duke's handbook of medicinal plants of Latin America. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 832 p. doi: 10.1201/9781420043174
- Fall R., Karl T., Hansel A., Jordan A., Lindinger W. Volatile organic compounds emitted after leaf wounding: On-line analysis by proton-transfer-reaction mass spectrometry. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 15963–15974. doi: 10.1029/1999JD900144
- Fink P. Ecological functions of volatile organic compounds in aquatic systems. *Mar. Freshwat. Behave. Physiol.* 2007. Vol. 40, no. 3. P. 155–168. doi: 10.1080/10236240701602218
- Han P., Huang Y., Xie Y., Yang W., Xiang W., Hylands P. J., Legid-Quigley C. Metabolomics reveals immunomodulation as a possible mechanism for the antibiotic effect of *Persicaria capitata* (Buch.-Ham. ex D. Don) H. Gross. *Metabolomics.* 2018. Vol. 14(91). P. 1–9. doi: 10.1007/s11306-018-1388-y
- Hao D. C., Gu X.-J., Xiao P. G. Phytochemical and biological research of Polygoneae medicinal resources. *Medicinal Plants. Chemistry, Biology and Omics.* 2015. P. 465–529. doi: 10.1016/B978-0-08-100085-4.00012-8
- Hegazy A. K., Amer W. M., Khedr A. A. Allelopathic effect of *Nymphaea lotus* L. on growth and yield of cultivated rice around Lake Manzala (Nile Delta). *Hydrobiologia.* 2001. Vol. 464. P. 133–142. doi: 10.1023/A:1013943318230
- Hinds H. R., Freeman C. C. *Persicaria* (L.) Mill. Flora of North America North of Mexico: Magnoliophyta: Caryophyllidae (part 2). Vol. 5 (Flora of North America Editorial Committee, ed.). New York & Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 574–594.
- Hu H., Hong Y. Algal-bloom control by allelopathy of aquatic macrophytes – A review. *Front. Environ. Sci. Engin. China.* 2008. Vol. 2, no. 4. P. 421–438. doi: 10.1007/s11783-008-0070-4
- Hu Z., Shen Y., Luo Y., Shen F., Gao H., Gao R. Aldehyde volatiles emitted in succession from mechanically damaged leaves of poplar cuttings. *J. Plant Biol.* 2008. Vol. 51, no. 4. P. 269–275.
- 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. Bd. 140. P. 241–272.
- Jüttner F., Messina P., Patalano C., Zupo V. Odour compounds of the diatom *Cocconeis scutellum*: effects on benthic herbivores living on *Posidonia oceanic*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2010. Vol. 400. P. 63–73. doi: 10.3354/meps08381
- Kurashov E. A., Krylova J. V., Mitrukova G. G., Chernova A. M. Low-molecular-weight metabolites of aquatic macrophytes growing on the territory of Russia and their role in hydroecosystems. *Contemp. Probl. Ecol.* 2014. Vol. 7, no. 4. P. 433–448. doi: 10.1134/S1995425514040064
- Kurashov E. A., Mitrukova G. G., Krylova Yu. V. Inter-annual variability of low-molecular metabolite composition in *Ceratophyllum demersum* (*Ceratophyllaceae*) from a floodplain lake with a changeable trophic status. *Contemp. Probl. Ecol.* 2018. Vol. 11, no. 2. P. 179–194. doi: 10.1134/S1995425518020063
- 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. Article ID 1205680. 9 p. doi: 10.1155/2016/1205680
- Morisita M. Measuring of interspecific association and similarity between communities. *Memoires of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology).* 1959. No. 3. P. 65–80.
- Nakai S., Yamada S., Hosomi M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum*. *Hydrobiologia.* 2005. Vol. 543. P. 71–78. doi: 10.1007/s10750-004-6822-7
- Persicaria*. *Plants of the world online*. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:60433517-2> (accessed: 03.11.2019).
- Prota N., Mumm R., Bouwmeester H. J., Jongsmma M. A. Comparison of the chemical composition of three species of smartweed (genus *Persicaria*) with a focus on drimane sesquiterpenoids. *Phytochemistry.* 2014. Vol. 108. P. 129–136. doi: 10.1016/j.phytochem.2014.10.001
- Rahnamaie-Tajadod R., Goh H.-H., Noor N. M. Methyl jasmonate-induced compositional changes of volatile organic compounds in *Polygonum minus* leaves. *J. Plant Physiol.* 2019. Vol. 240. Art. 152994. doi: 10.1016/j.jplph.2019.152994
- Secondary Metabolites in Soil Ecology*. Ed. P. Karlovsky. Soil Biology. Vol. 14. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 293 p.
- Soni B., Ranawat M. S., Sharma R., Bhandari A., Sharma S. Synthesis and evaluation of some new benzothiazole derivatives as potential antimicrobial agents. *Eur. J. Med. Chem.* 2010. Vol. 45(7). P. 2938–2942. doi: 10.1016/j.ejmech.2010.03.019
- 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. P. 1–34.

Sun X., Jin H., Zhang L., Hu W., Li Y., Xu N. Screening and isolation of the algicidal compounds from marine green alga *Ulva intestinalis*. *Chin. J. Ocean. Limnol.* 2016. Vol. 34. P. 781–788. doi: 10.1007/s00343-016-4383-z

Swapna M. M., Prakashkumar R., Anoop K. P., Manju C. N., Rajith N. P. A review on the medicinal and edible aspects of aquatic and wetland plants of India. *J. Med. Plants Res.* 2011. Vol. 5, no. 33. P. 7163–7176.

Volodin V., Chadin I., Whiting P., Dinan L. Screening plants of European North-East Russia for ecdysteroids. *Biochem. Syst. Ecol.* 2002. Vol. 30. P. 525–578.

Walsh K., Jones G. J., Dunstan R. H. Effect of high irradiance and iron on volatile odour compounds in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Phytochemistry.* 1998. Vol. 49. no. 5. P. 1227–1239. doi: 10.1016/s0031-9422(97)00943-6

Watson S. B., Caldwell G., Pohnert G. Fatty acids and oxylipins as semiochemicals. *Lipids in Aquatic Ecosystems*. Springer, 2009. P. 65–91.

Wenchuan Q., Dickman M., Sumin W., Ruijin W., Pingzhong Z., Jianfa C. Evidence for an aquatic plant

origin of ketones found in Taihu Lake sediments. *Hydrobiologia.* 1999. Vol. 397. P. 149–154. doi: 10.1023/A:1003624625076

Zheng L., Lu Y., Cao X., Huang Y., Liu Y., Tang L., Wang Y.-L. Evaluation of the impact of *Polygonum capitatum*, a traditional Chinese herbal medicine, on rat hepatic cytochrome P450 enzymes by using a cocktail of probe drugs. *J. Ethnopharmacol.* 2014. Vol. 158. P. 276–282. doi: 10.1016/j.jep.2014.10.031

Zhou J., Xie G., Yan X. Encyclopedia of traditional Chinese medicines. Molecular structures, pharmacological activities, natural sources and applications. Vol. 6: Indexes. Springer, 2011. 730 p. doi: 10.1007/978-3-642-16744-7.

Zuo S., Zhou S., Ye L., Ding Y., Jiang X. Antialgal effects of five individual allelochemicals and their mixtures in low level pollution conditions. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. Vol. 23. P. 15703–15711. doi: 10.1007/s11356-016-6770-6

Received October 12, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Крылова Юлия Викторовна

и. о. заведующего лаб. рыбохозяйственной экологии, к. г. н., доцент
Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга)
наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, Россия, 199053
эл. почта: juliakrylova@mail.ru

Курашов Евгений Александрович

заведующий лаб. гидробиологии, д. б. н., проф.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
главный научный сотрудник
Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга)
наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, Россия, 199053
эл. почта: evgeny_kurashov@mail.ru

Русанов Александр Геннадьевич

старший научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. б. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: a_rusanov@yahoo.com

CONTRIBUTORS:

Krylova, Julia

St. Petersburg Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO (GosNIORKh named after L. S. Berg)
26 Nab. Makarova, 199053 St. Petersburg, Russia
e-mail: juliakrylova@mail.ru

Kurashov, Evgeny

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
St. Petersburg Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO (GosNIORKh named after L. S. Berg)
26 Nab. Makarova, 199053 St. Petersburg, Russia
e-mail: evgeny_kurashov@mail.ru

Rusanov, Alexander

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
e-mail: a_rusanov@yahoo.com