

УДК 577.115.3

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И ЖИРНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ *RANUNCULUS CIRCINATUS* SIBTH. (RANUNCULACEAE) ИЗ ДЕЛЬТЫ РЕКИ СЕЛЕНГИ

© С.В. Жигжитжапова^{1*}, Е.П. Дыленова¹, Е.П. Никитина¹, В.Г. Ширеторова¹, А.Н. Абатуров^{1,2},
О.А. Аненхонов³, С.В. Базарсадуева¹, Л.Д. Раднаева¹

¹ Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, 6,
Улан-Удэ, 670047 (Россия), e-mail: Zhig2@yandex.ru

² Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова,
ул. Смолина, 24а, Улан-Удэ, 670000 (Россия)

³ Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН,
ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047

Лютик завитой (*Ranunculus circinatus* Sibth.) – бореальный, евроазиатский вид. В данной работе впервые изучены содержание тяжелых металлов и состав жирных кислот *R. circinatus* дельты р. Селенги – основного притока оз. Байкал. Установлено, что растения л. завитого дельты р. Селенги накапливают в значительных количествах металлы, из которых в наибольшем количестве Fe и Mn, тогда как содержание Pb и Cd ниже предела обнаружения. Пальмитиновая C16:0, миристиновая C14:0 и стеариновая C18:0 кислоты являются основными насыщенными жирными кислотами. Содержание ненасыщенных кислот варьирует от 53.7 до 58.6 отн.% и представлено кислотами п3-, п6-, п7- и п9-семейств. Вне зависимости от места и года сбора образцов доминирующими ненасыщенными кислотами являются линоленовая 18:3п3, линолевая 18:2п6 и пальмитолеиновая 16:1п7. Наличие изо-, антеизо- и 2-гидроксикислот в образцах связано с разрастанием микробных сообществ на растениях, а таких кислот как 17:1п7 и 20:3п6 – с обитанием животных в зарослях л. завитого. Полученные нами сведения подтверждают, что растения дельты вносят вклад в функционирование такого мощного естественного биофильтра как дельта р. Селенги.

Ключевые слова: *Ranunculus circinatus*, водные растения, тяжелые металлы, жирные кислоты, Байкальский регион, дельта, река Селенга.

Исследования выполнены в рамках государственных заданий AAAA-A21-121011890027-0, FWSU-2021-0010 (БИП СО РАН), № 121030900138-8 (ИОЭБ СО РАН).

Введение

Подрод Водный лютик, или шелковник (*Batrachium* (DC.) Peterm.) из рода лютик (*Ranunculus* L., Ranunculaceae Juss.), объединяет высшие водные растения, распространенные в водоемах Северного полушария. Ранее подрод считался как самостоятельный род *Batrachium* (DC.) S.F. Gray, но согласно современной номенклатуре [1] рассматривается как подрод рода *Ranunculus* L.

Жигжитжапова Светлана Васильевна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: Zhig2@yandex.ru

Дыленова Елена Петровна – кандидат фармацевтических наук, старший научный сотрудник, e-mail: edylenova@mail.ru

Никитина Елена Петровна – младший научный сотрудник, e-mail: lenauude@mail.ru

Ширеторова Валентина Германовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: vshiretorova@rambler.ru

Окончание на С. 172.

Представители подрода играют важную роль в фитоценозах водоемов. Считается, что увеличение площадей, занятых шелковниками, является признаком деградации экосистем водоемов и водотоков [2]. Вместе с тем заросли шелковников служат идеальным местом нагула молодежи многих рыб и создают благоприятные условия для жизни других гидробионтов [3–5]. На Байкале отмечено 4 вида этого подрода, одним из которых является лютик завитой (*Ranunculus circinatus* Sibth., син.

* Автор, с которым следует вести переписку.

Batrachium circinatum (Sibth.) Spach) [6]. Это бореальный, евроазиатский вид, ареал которого охватывает территорию Европы, за исключением ее севера и Средиземноморья, а также азиатские территории – Кавказ, Сибирь, Дальний Восток, север Средней Азии и Монголии. Наиболее полная характеристика экологии, фитоденологии вида и роли в экосистеме представлена в работе [7]. В литературе имеются данные о морфологии л. завитого в Рыбинском водохранилище. Показано, что л. завитой может быть представлен разнообразными жизненными формами и образовывать наземные формы, все особи способны к вегетативному размножению. Тем не менее *R. circinatus* считается видом с устойчивыми морфологическими признаками. В целом, подвид *Batrachium* считается одним из сложных в таксономическом отношении.

Нами исследованы содержание тяжелых металлов и состав жирных кислот в растениях л. завитого, произрастающих в дельте р. Селенги. Основной сток воды (около 50%) в оз. Байкал осуществляется через р. Селенгу. Вместе с речными водами в озеро поступает огромное количество растворенного, взвешенного и влекомого терригенного материала, который большей частью откладывается в устье реки, образуя классическую дельту лопастного типа. Сток в дельте р. Селенги неравномерный, из-за чего она разделяется на 3 сектора [8]: Лобановский (основные протоки – Лобановская, Новый и Средний Перемой), Среднеустьевский (протоки Среднеустье и Колпинная) и Селенгинский (основное русло Селенги, протоки Левобережная, Харауз, Галутай, Глубокая, Шумиха, Шаманка). Во время высоких паводков большая часть дельтовых озер заливается, в результате чего речные воды смешиваются с озерными и выносятся в Байкал, поставляя в него биогенные и органические вещества, а также другие химические и биологические компоненты. Растительность дельты выступает в роли биологических «ловушек» [9]. Изучение содержания тяжелых металлов (Fe, Mn, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) в водных растениях позволяет оценить их реальные уровни на территории произрастания. Это обусловлено тем, что, во-первых, они, в отличие от органических веществ, не подвергаются деградации и, во-вторых, прикрепленность макрофитов к субстрату обеспечивает абсорбцию ими металлов из водной среды в определенной точке водоема. В связи с этим макрофиты представляют собой релевантный объект для изучения аккумуляции тяжелых металлов водными организмами, что отражается в большом внимании к ним в данном направлении исследований. В частности, имеются сведения, что листья *R. circinatus* обладают высоким потенциалом абсорбции Pb, Zn и Co по сравнению с корнями и стеблями [10].

Релевантность макрофитов для изучения аккумуляции тяжелых металлов косвенно подтверждается и тем, что библиотека eLibrary.ru на поисковый запрос по теме «Тяжелые металлы водных растений» дает 6870 публикаций. Жирные кислоты могут служить биохимическими маркерами источников и путей трансформации органического вещества в водных экосистемах, выступать также в качестве хемотаксономических маркеров. Данные о жирнокислотном составе *R. circinatus* отсутствуют. Имеются лишь малочисленные сведения о жирнокислотном составе других водных растений Прибайкалья, в частности, некоторых видов родов *Myriophyllum*, *Potamogeton*, а также *Elodea canadensis* Байкальского региона – из р. Ангары [11] и оз. Гусиное [12, 13], *Nymphoides peltata* из водоемов Забайкалья [14], *Myriophyllum spicatum*, *Ceratophyllum demersum*, видов *Potamogeton*, *Nuphar pumila* из дельты Селенги [15]. Выявлены изменения в жирнокислотном составе *Myriophyllum spicatum* и *Elodea canadensis* р. Ангары под воздействием гипертермии и хлорида кадмия [16]. Таким образом, изучение содержания тяжелых металлов и состава жирных кислот в растениях *R. circinatus* вносит вклад в понимание биофильтрационных функций водной растительности, как в отношении тяжелых металлов, так и органического вещества, за счет биохимического маркирования путей его возможной трансформации, а также может способствовать мониторингу содержания поллютантов.

Цель настоящей работы – определить содержание тяжелых металлов и состав жирных кислот в растениях *Ranunculus circinatus* дельты реки Селенги.

Экспериментальная часть

Абатуров Артем Николаевич – студент,
e-mail: abaturov2000@gmail.com

Аненхонов Олег Арнольдович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией, e-mail: anen@yandex.ru

Базарсадуева Сэлмэг Владимировна – кандидат биологических наук, научный сотрудник,
e-mail: bselmeg@gmail.com

Раднаева Лариса Доржиевна – доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник,
e-mail: radld@mail.ru

Сбор растений производили в дельте р. Селенги – в протоках Галутай и Лобановская в конце июля 2020 г. и в протоке Лобановская в начале сентября 2021 г. В июле-августе 2021 г. в результате сильного паводка наблюдался выход воды на пойму, вследствие чего в протоке Галутай были затоплены места произрастания л. завитого, что сделало невозможным отбор проб в данной точке. Гербарные образцы определены д.б.н. О.А. Анен-

хоновым, ваучерный образец из протоки Лобановская хранится в гербарии ИОЭБ СО РАН (UUN 018783, 18784). Стебель л. завитого длинный, слабоветвящийся, голый. Листья все погруженные, сидячие (нижние на коротких черешках), стеблеобъемлющие, в очертании округлые, 1–2 см в диаметре, вне воды неспадающиеся, 2–3-кратно тройчаторассеченные, листовые сегменты лежат в одной плоскости. Листья расположены перпендикулярно к стеблю и в 4–5 раз короче междоузлий. Цветки 15–18 мм диаметром, на длинных цветоносах. Лепестки обратнойцевидные, около 10 мм длиной [2]. Отобранные экземпляры л. завитого очищали от посторонних примесей (другие высшие растения и водоросли, ил), высушивали до воздушно-сухого состояния (в.с.с.) и растирали.

Пробы воды отбирали в предварительно очищенную полипропиленовую бутылку и сразу отфильтровывали через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм, консервирование проводили концентрированной азотной кислотой до pH ниже 2. Образцы донных отложений (ДО) отбирали из поверхностного слоя дночерпателем Петерсена с площадью захвата 250 см², затем высушивали и растирали до размера частиц менее 0.1 мкм.

Подготовку образцов к элементному анализу проводили путем предварительного разложения сухих, тщательно измельченных образцов (0.5 г) в сосудах из фторполимерных материалов XP-1500 Plus в микроволновой системе MARS 6 (CEM, США) с использованием концентрированной азотной кислоты (10 мл) для растительного сырья, и смеси кислот (9 мл HNO₃, 3 мл HF и 2 мл HCl) – для донных осадков. Обработку сосудов проводили по стандартным программам для микроволновой системы. По окончании программы разложения сосуд с минерализованной пробой охлаждали в вытяжном шкафу, количественно переносили в мерную колбу на 50 мл и доводили дистиллированной водой до метки. Если разложенный образец донных осадков содержал твердые частицы, образец фильтровали. В полученном растворе определяли содержание элементов. Анализ проводили в трех повторностях. Содержание тяжелых металлов (Fe, Mn, Zn, Ni, Cd, Cr, Cu и Pb) в исследуемых образцах определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрометра (Solaar M6, Thermo Electron Corporation, США), с использованием электротермического атомизатора для проб воды и пламенного атомизатора – для донных отложений и растительного сырья, погрешность метода составила 5–10%.

Для определения жирнокислотного состава измельченное сырье массой 4 г экстрагировали 30 мл смеси хлороформ-метанол (1 : 2 по объему). Смесь гомогенизировали в течение 15 мин на встряхивателе. Гомогенат фильтровали, оставшуюся на фильтре ткань повторно гомогенизировали в смеси 30 мл хлороформ-метанол (1 : 2) и 8 мл воды очищенной. Гомогенат фильтровали, остаток промывали на фильтре 15 мл смеси хлороформ-метанол (1 : 2). К объединенному экстракту добавляли 25 мл хлороформа и 29 мл воды. Хлороформный и водно-метанольный слои разделяли в делительной воронке. Хлороформный слой (представляет собой выделенные липиды) упаривали досуха на ротационном испарителе. К аликвоте общих липидов (1 мг) добавляли 1 мл раствора 2 N соляной кислоты в метаноле и выдерживали 2 ч при температуре 90 °C. Полученный раствор упаривали током аргона. К реакционной смеси добавляли 0.5 мл воды очищенной и 1 мл гексана. Верхний слой гексана отделяли и процедуру повторяли трехкратно [17].

Жирнокислотный состав исследовали методом хромато-масс-спектрометрии на газовом хроматографе Agilent Packard HP 6890 с квадрупольным масс-спектрометром (HP MSD 5973 N) в качестве детектора. Процентный состав жирных кислот вычисляли по площадям газохроматографических пиков. Качественный анализ основан на сравнении времен удерживания и полных масс-спектров соответствующих чистых соединений с использованием библиотеки данных NIST14 и стандартных смесей Bacterial Acid Methyl Esters (CP Mix, Supelco, Bellefonte, PA, USA) и Fatty Acid Methyl Esters (Supelco 37 comp. FAME Mix 10 mg/ml in CH₂Cl₂).

Статистическая обработка данных производилась с помощью пакета программ Microsoft Office Excel 2007. Для контроля точности измерений и полноты извлечения металлов применяли биологический стандартный образец элодеи канадской (ЭК-1) ГСО 8921-2007, СО КООМЕТ 0065-2008-RU (Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН), донные отложения оз. Байкал (ВЛ-2) ГСО 7176-95 (Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН). Полнота извлечения элементов для стандартных образцов элодеи канадской и донных отложений оз. Байкал составила: Fe – 97.6–99.2%, Mn – 98.8–101.9%, Zn – 95.4–96.8%, Ni – 99.5–101.1%, Cr – 96.2–98.1%.

Обсуждение результатов

Содержание супертоксикантов Pb и Cd в образцах *R. circinatus* ниже предела обнаружения (табл. 1). Прочие исследованные металлы Fe, Mn, Zn, Cu, Ni и Cr являются микронутриентами для автотрофных организмов, хотя в высоких концентрациях они обладают токсическим эффектом [18]. Их содержание убывает в следующем порядке в растениях из протоки Лобановской: Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Cr, протоки Галутай – Mn>Fe>Zn>Cu>Ni>Cr.

В наибольшем количестве накапливаются такие жизненно важные элементы как Fe и Mn (табл. 1). При сборе в один и тот же год наибольшее их содержание отмечено в растениях протоки Лобановская по сравнению с растениями протоки Галутай. Поскольку Fe, и Mn являются малоподвижными металлами, то их пространственное распределение связано с аккумуляцией наносов из речного стока. В свою очередь распределение взвешенных наносов в процентном отношении коррелирует с водностью проток. Хотя в настоящее время оценить развитие дельтовой экосистемы в полноводные периоды, какими были 2020 и 2021 гг., сложно из-за недостаточной обеспеченности фактическими данными о распределении стока в дельте. Так, в 2013 году, когда вода в протоках вышла на пойму и затопленными оказались многие острова и междуречья, сток через протоку Лобановская был выше и составил (составил около 10%), чем через протоку Галутай (6.5–7.0%) [19]. Также, различия в содержании тяжелых металлов могут быть обусловлены расположением проток: Лобановская протекает по северному краю дельты, где расположено большое количество поселений, Галутай же находится вблизи среднего сектора дельты, вдали от прямого антропогенного влияния. В 2021 г. значительно увеличилось содержание всех металлов, особенно Fe и Mn, что коррелирует с данными по их содержанию в воде и донных осадках (табл. 1). Повышение содержаний металлов в 2021 г. было обусловлено поступлением загрязняющих веществ с водосбора в результате сильного дождевого паводка.

Сравнительный анализ содержания изученных тяжелых металлов с ранее полученными нами данными по высшим растениям из водоема с высокой антропогенной нагрузкой – оз. Гусино [20], показал, что их содержание в *R. circinatus* из дельты р. Селенги значительно выше. Например, максимальное содержание Mn в высших водных растениях оз. Гусино, в частности, в *Myriophyllum* составляет 471 ± 5 мг/кг, тогда как в л. завитом протоки Лобановская – 6439 ± 84 мг/кг (табл. 1), то есть содержание выше в 13–14 раз. В работе [15] установлено, что биогеохимическая специализация высшей водной растительности дельты р. Селенги заключается в преобладании накопления Mn и Mo. По нашим данным, в растениях *R. circinatus* из дельты р. Селенги особенно высоко содержание Fe и Mn и это согласуется с высоким содержанием данных элементов в донных отложениях. Отметим, что содержание Fe и Mn в растениях *R. circinatus* из дельты р. Селенги на два порядка превышает таковое в растениях этого вида из Украины, тогда как по Pb в селенгинских растениях содержание ниже предела обнаружения, а показатели по Zn и Ni относительно сопоставимы с содержанием в растениях *R. circinatus* из Украины [10]. Высокое содержание тяжелых металлов в л. завитом связано с фильтрационными функциями дельты р. Селенга. Известно, что высшая растительность дельты р. Селенги выступает в качестве биофильтра на пути поллютантов в озеро Байкал [21]. Тем более что округлые с многочисленными узкими дольками, образующими своего рода «сеть», листья л. завитого могут задерживать большое количество взвешенных частиц.

Известно, что под воздействием тяжелых металлов происходят изменения в жирнокислотном составе мембран растений [10, 15]. Наряду с тяжелыми металлами был исследован жирнокислотный состав *R. circinatus* дельты р. Селенги, который представлен 33 кислотами. В таблице 2 приведены жирные кислоты с относительным содержанием более 0.1 отн.%. Сумма насыщенных жирных кислот колеблется от 41.60 до 46.53 отн.%. Основной насыщенной жирной кислотой является пальмитиновая C16:0 кислота, далее по содержанию следуют миристиновая C14:0 и стеариновая C18:0 кислоты. Количество пальмитиновой C16:0 кислоты составляет 22.17–27.30 отн.% при сборе в одном году, но в разных протоках дельты. При сборе в одном и том же месте, но в разные годы, различие в содержании более заметно. Миристиновая C14:0 и стеариновая C18:0 кислоты присутствуют в значительно меньших количествах. Их уровни также изменяются в зависимости от места произрастания, а также года сбора. При этом различия в их количественном содержании более заметны в разные годы сбора. Количество других насыщенных кислот еще меньше. Такое распределение по содержанию указанных кислот характерно для многих систематических групп растений [22].

Наряду с прямоцепочечными предельными жирными кислотами с четным числом атомов найдены и кислоты с нечетным числом атомов (пентадекановая C15:0, геттадекановая C17:0 и др.), а также дикарбоновые (азелаиновая C9:0dca и себациновая C10:0dca) кислоты. Их происхождение неясно, поскольку кислоты с нечетным числом углеродных атомов могут синтезировать как сами растения, так и микроорганизмы, живущие в/на них. Найдены также разветвленные изо- (i15:0, i16:0 и др.), антеизо- (ai15:0) и 2-гидроксициклоты (2OH-10:0, 2OH-12:0, 2OH-16:0) с содержанием от 0.01 до 1.55 отн.%. Известно, что эти кислоты характерны для бактерий и микроскопических грибов [23]. Поэтому наличие идентифицированных нами кислот разветвленного строения может быть связано с разрастанием микробных сообществ на водных растениях, что, в частности, наблюдалось в июле 2020 г. В сентябре 2021 г. после сильных дождевых паводков указанные жирные кислоты обнаружены не были.

Таблица 1. Содержание металлов в растениях лютика завитого (*Ranunculus circinatus*), донных отложениях и воде дельты реки Селенга (мг/кг воздушно-сухой массы для растений и донных отложений (ДО), мкг/л для воды)

Место отбора	Лобановская, 2020			Лобановская, 2021			Галутай, 2020		
	лютик завитой	вода	донные отложения	лютик завитой	вода	донные отложения	лютик завитой	вода	донные отложения
Fe	5686±124	80.0±2.6	32359±289	23132±368	186.2±9.1	88156±745	1723±35	62.7±3.0	43566±376
Mn	5218±89	2.6±0.2	685±11	6439±84	17.7±1.2	971±10	2581±107	3.1±0.2	846±10
Zn	8.7±0.6	1.0±0.1	56.3±0.9	39.0±1.0	4.1±0.3	94.9±1.8	10.0±1.5	1.4±0.1	75.4±0.8
Cu	7.4±0.5	2.7±0.2	13.2±0.3	15.5±0.9	3.1±0.2	20.1±0.4	8.3±0.2	1.6±0.1	21.3±0.4
Ni	7.6±0.5	н/о	8.3±0.2	9.3±0.8	0.5±0.1	17.7±0.3	7.1±0.2	н/о	17.1±0.3
Cr	5.1±0.3	н/о	41.8±0.8	6.5±0.6	0.7±0.1	49.9±1.0	3.8±0.1	н/о	58.2±0.6
Pb	н/о*	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Cd	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о

Примечание. * – ниже предела обнаружения для растений и ДО: Pb (0.2 мг/кг), Cd (0.1 мг/кг); для образцов воды: Ni (0.02 мкг/л), Pb, Cr (0.05 мкг/л), Cd (0.01 мкг/л).

Таблица 2. Жирные кислоты растений *Ranunculus circinatus* Sibth. дельты реки Селенги по данным ГХ/МС, % от суммы компонентов

Кислота	Протока Лобановская		Протока Галутай
	2020	2021	2020
Азелаиновая 9:0dca	0.62	—*	1.18
Себациновая 10:0dca	0.44	—	0.25
2-гидроксигексадекановая 2ОН-16:0	1.55	—	1.07
Изопентадекановая i-15:0	0.44	—	0.39
Антеизо-пентадекановая ai-15:0	0.21	—	0.12
Изопальмитиновая i-16:0	0.64	—	0.75
Изогептадекановая i-17:0	0.14	—	0.16
Каприловая 8:0	0.22	0.26	0.23
Лауриновая 12:0	0.92	0.11	0.51
Миристиновая 14:0	2.36	4.89	2.53
Пентадекановая 15:0	1.05	1.40	1.29
Пальмитиновая 16:0	27.30	32.42	22.17
Гептадекановая 17:0	0.84	0.21	0.75
Стеариновая 18:0	3.78	1.44	3.95
Нонадекановая 19:0	0.33	—	0.22
Арахидиновая 20:0	1.13	0.35	1.10
Генейкозановая 21:0	0.65	0.24	0.57
Докозановая 22:0	1.92	2.09	2.13
Трикозановая 23:0	0.52	1.35	0.69
Лигноцериновая 24:0	1.06	—	1.06
∑ насыщенных жирных кислот	46.3	44.9	41.4
Пальмитолеиновая 16:1n7	7.43	10.95	5.46
Гептадеценивая 17:1n7	0.55	—	0.58
Олеиновая кислота 18:1n9	1.77	1.02	1.13
Линолевая 18:2n6	10.45	9.71	21.92
Линоленовая 18:3n3	32.37	33.33	28.74
11-эйкозеновая 20:1n9	0.65	0.11	—
8,11,14-эйкозатриеновая 20:3n6	0.45	—	0.77
∑ ненасыщенных жирных кислот	53.7	55.1	58.6

Примечание. *«←» кислота не обнаружена.

Содержание ненасыщенных кислот колеблется от 53.7 до 58.6 отн. %, они представлены кислотами n3-, n6-, n7- и n9-семейств. Вне зависимости от места и года сбора доминирующими ненасыщенными кислотами являются линоленовая 18:3n3 (28.074–33.33 отн. %), линолевая 18:2n6 (9.71–21.92 отн. %) и пальмитолеиновая 16:1n7 (5.46–10.95 отн. %). Кислота n9-семейства – олеиновая кислота 18:1n9 обнаружена в меньших количествах 1.02–1.77 отн. %. Кислоты 17:1n7 и 20:3n6, характерные для животных, обнаружены только в июле 2020 г. в количествах, не превышающих 0.77 отн. %, в то время как редкая растительная 20:1n9

обнаружена в растениях *R. circinatus* из протоки Лобановская в оба года сбора. Нахождение кислот животного происхождения в образцах л. завитого свидетельствует о присутствии гидробионтов (например, моллюды рыб) в его зарослях.

Известно, что под воздействием факторов окружающей среды происходят изменения в липидном и жирнокислотном составе мембран растений, что отражается на ассоциированных с ними процессах жизнедеятельности. Такие поллютанты, как тяжелые металлы, обладающие значительной токсичностью, подвижностью, проницаемостью и кумулятивностью, присутствуя в водоемах, оказывают значительное влияние на водные организмы [24–27]. Под воздействием тяжелых металлов нарушаются функции мембран, показателем их трансформации служат изменения в составе жирных кислот [24–25, 28–29]. Установлено, что в результате сильного дождевого паводка наблюдалось повышение содержания металлов, особенно Fe и Mn, в воде, донных осадках и, соответственно, в тканях растений *R. circinatus*, отобранных в 2021 году в протоке Лобановская дельты р. Селенги, что, вероятно, оказало влияние и на жирнокислотный состав исследованных растений. Так, ранее было показано, что в растениях из р. Ангары [15] при воздействии хлорида кадмия в течение 24 ч у *Myriophyllum spicatum* наблюдалось увеличение содержания миристиновой 14:0 и пентадекановой 15:0 кислот, после 48 ч у *Elodea canadensis* увеличилось содержание суммы изомеров пальмитоолеиновой 16:1 и суммы цис-вакценовой 18:1n7 и олеиновой 18:1n9 кислот, уменьшилось содержание α -линоленовой 18:3n3 кислоты. Схожие тенденции прослеживаются в изученных нами образцах л. завитого дельты р. Селенги: при увеличении загрязненности тяжелыми металлами в 2021 году повышается содержание миристиновой 14:0, пентадекановой 15:0 и пальмитоолеиновой 16:1 кислот. Для выявления более достоверных взаимосвязей жирнокислотного состава липидов водных растений с загрязнением тяжелыми металлами необходимо проведение дальнейших исследований, которые также будут полезны для эколого-биохимического мониторинга состояния водоемов.

Выводы

Впервые изучены содержание тяжелых металлов и жирнокислотный состав побегов *Ranunculus circinatus* дельты р. Селенги.

Растения л. завитого дельты р. Селенги накапливают в значительных количествах тяжелые металлы, в наибольшем количестве накапливают Fe и Mn, содержание Pb и Cd ниже предела обнаружения.

Несмотря на то, что все идентифицированные кислоты найдены в составе масел семян других растений, в том числе и водных [23], наличие изо-, антеизокилоты и 2-гидроксикислоты связано с разрастанием микробных сообществ на растениях, а кислот 17:1n7 и 20:3n6 – с обитанием гидробионтов в зарослях л. завитого.

Показано, что содержание некоторых жирных кислот (миристиновой – C14:0, пентадекановой – C15:0, пальмитоолеиновой – C16:1) в тканях растений *R. circinatus* увеличивается при усилении загрязненности тяжелыми металлами, однако эти результаты нуждаются в дальнейших исследованиях.

Полученные нами сведения также подтверждают то, что растения вносят вклад в функционирование дельты р. Селенги как мощного естественного биофильтра, перехватывающего биогенные элементы, токсические вещества, некоторые минеральные и органические соединения с водосборной площади в летнее время [9]. В частности, заросли л. завитого образуют благоприятные условия для развития гидробионтов – от микроорганизмов до рыб, которые, в свою очередь, в процессе своей жизнедеятельности способствуют утилизации, деградации и депонированию соединений, поступающих с водами р. Селенги.

Список литературы

1. Bánki O., Roskov Y., Döring M., Ower G., Vandepitte L., Hobern D., Remsen D., Schalk P., DeWalt R.E., Keping M., Miller J., Orrell T., Aalbu R., Adlard R., Adriaenssens E.M., Aedo C., Aesch E., Akkari N., Alfenas-Zerbini P. et al. Catalogue of Life Checklist (Version 2022-02-18). DOI: 10.48580/dfp4.
2. Лебедева О.А., Лапиров А.Г. О распространении некоторых видов шелковников (Ranunculaceae) в водоемах и водотоках Ярославского Поволжья // Ярославский педагогический вестник (Естественные науки). 2013. Т. 3. №2. С. 55–60.
3. Лебедева О.А., Лапиров А.Г. Ритм сезонного развития и морфологическая поливариантность *Batrachium circinatum* (Sibth.) Spach. на Рыбинском водохранилище // Биология внутренних вод. 2009. №3. С. 36–40.
4. Мовергоз Е.А., Лапиров А.Г., Лебедева О.А. Онтогенез *Batrachium circinatum* (Ranunculaceae) в условиях Рыбинского водохранилища // Ботанический журнал. 2011. Т. 96. №6. С. 794–804.

5. Лебедева О.А., Гарин Э.В., Беляков Е.А. Образование наземной формы у *Batrachium circinatum* (Sibth.) Spach. (Ranunculaceae Juss.) в условиях колеблющегося уровня воды // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. №12-8. С. 1442–1444.
6. Азовский М.Г., Чепинога В.В. Флора высших растений озера Байкал. Иркутск, 2007. 157 с.
7. Бобров А.А., Мовергоз Е.А. Экологические и фитоценотические особенности *Batrachium circinatum*, *B. trichophyllum* и *B. kauffmannii* (Ranunculaceae) // Ботанический журнал. 2014. №3. С. 325–339.
8. Корытный Л.М., Ильичева Е.А., Павлов М.В. и др. Гидролого-морфологический подход к районированию дельты реки Селенги // География и природные ресурсы. 2012. №3. С. 47–54.
9. Дельта реки Селенги как естественный биофильтр и индикатор состояния озера Байкал / отв. ред. А.К. Тулохонов, А.М. Плюснин. Новосибирск, 2008. 314 с.
10. Скиба О.І., Грубінко В.В., Федонюк Л.Я. Запобігання забрудненню гідроекосистем важкими металами як одна з форм реалізації цілей сталого розвитку в Україні // Теоретична Екологія. 2018. №5. С. 101–105.
11. Кириченко К.А., Побежимова Т.П., Соколова Н.А., Столбикова А.В., Дударева Л.В., Войников В.К. Жирнокислотный состав общих липидов высших водных растений из реки Ангары // Химия растительного сырья. 2011. №2. С. 97–102.
12. Zhigzhitzhapova S.V., Dylenova E.P., Anenkhonov O.A., Taraskin V.V., Radnaeva L.D. Lipid Fraction Composition of *Myriophyllum sibiricum* // Chemistry of Natural Compounds. 2019. Vol. 55. Pp. 102–104.
13. Zhigzhitzhapova S.V., Pintaeva E.Ts., Dylenova E.P., Tykheev Zh.A., Radnaeva L.D. Fatty-acid Compositions of *Potamogeton pectinatus* and *P. perfoliatus* // Chemistry of Natural Compounds. 2020. Vol. 56. Pp. 309–311.
14. Zhigzhitzhapova S.V., Dylenova E.P., Nikitina E.P., Tykheev Zh.A., Pintaeva E.Ts., Radnaeva L.D., Tsybekmitova G.Ts. Composition of fatty acid from *Nymphoides peltata* (S.G. Gmelin) O. Kuntze // Chemistry of Natural Compounds. 2021. Vol. 57. Pp. 743–745.
15. Shinkareva G.L., Lychagin M.Yu., Tarasov M.K., Pietron J., Chichayeva M.A., Chalov S.R. Biogeochemical specialization of macrophytes and their role as a biofilter in the Selenga delta // Geography, Environment, Sustainability. 2019. Vol. 12. Pp. 240–263. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-103.
16. Кириченко К.А. Изменения жирнокислотного состава высших водных растений реки Ангары под воздействием гипертермии и хлорида кадмия // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2013. Т. 6. №3(1). С. 9–13.
17. Kates M. Techniques of Lipidology: Isolation, Analysis, and Identification of Lipids. New York, 1972. 610 p.
18. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск, 2014. 194 с.
19. Ильичева Е.А. Внутридельтовое распределение стока реки Селенги // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2017. №4. С. 64–73.
20. Жигжитжапова С.В., Павлов И.А., Ширеторова В.Г., Дыленова Е.П., Раднаева Л.Д., Тулохонов А.К. Содержание металлов в водных растениях оз. Гусиное // Вода: химия и экология. 2019. №1-2. С. 34–40.
21. Шинкарева Г.Л. Геохимия тяжелых металлов и металлоидов в компонентах аквальных ландшафтов бассейна р. Селенги: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2018. 24 с.
22. Розенцвет О.А., Федосеева Е.В., Терехова В.А. Липидные биомаркеры в экологической оценке почвенной биоты: анализ жирных кислот // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139. №2. С. 161–177.
23. PlantFAdb database. [Электронный ресурс]. URL: https://plantfadb.org/fatty_acids.
24. Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф., Ветчинникова Л.В. Влияние кадмия на состав жирных кислот липидов в побегах карельской березы *in vitro* // Физиология растений. 2008. Т. 55. №5. С. 731–737.
25. Гармаш Е.В., Головки Т.К. Влияние кадмия на рост и дыхание ячменя при двух температурных режимах выращивания // Физиология растений. 2009. Т. 56. №3. С. 382–387.
26. Квеситадзе Г.И., Хатисашвили Г.А., Садунишвили Т.А., Евстигнеева З.Г. Метаболизм антропогенных токсиантов в высших растениях. М., 2005. 199 с.
27. Моисеенко Т.И. Водная экотоксикология: теоретические и прикладные аспекты. М., 2009. 400 с.
28. Нестеров В.Н., Розенцвет О.А., Мурзаева С.В. Изменение состава липидов у пресноводного растения *Hydrilla verticillata* при накоплении и удалении из тканей ионов тяжелых металлов // Физиология растений. 2009. Т. 56. №5. С. 97–106.
29. Холодова В.П., Волков К.С., Кузнецов В.В. Адаптация к высоким концентрациям солей меди и цинка растений хрустальной травки и возможность их использования в целях фиторемедиации // Физиология растений. 2005. Т. 52. №6. С. 848–858.

Поступила в редакцию 15 апреля 2022 г.

После переработки 25 мая 2022 г.

Принята к публикации 26 мая 2022 г.

Для цитирования: Жигжитжапова С.В., Дыленова Е.П., Никитина Е.П., Ширеторова В.Г., Абатуров А.Н., Аненхонов О.А., Базарсадуева С.В., Раднаева Л.Д. Тяжелые металлы и жирнокислотный состав растений *Ranunculus circinatus* Sibth. (Ranunculaceae) из дельты реки Селенга // Химия растительного сырья. 2022. №4. С. 171–179. DOI: 10.14258/jcprm.20220411286.

Zhigzhitzhapova S.V.^{1*}, Dylenova E.P.¹, Nikitina E.P.¹, Shiretorova V.G.¹, Abaturov A.N.^{1,2}, Anenkhonov O.A.³, Bazaradueva S.V.¹, Radnaeva L.D.¹ HEAVY METALS AND FATTY ACID COMPOSITION OF *RANUNCULUS CIRCINATUM* (SIBTH.) SPACH. (RANUNCULACEAE) FROM THE DELTA OF THE SELENGA RIVER

¹ Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of RAS, ul. Sakhyanovoy, 6, Ulan-Ude, 670047 (Russia), e-mail: Zhig2@yandex.ru

² Banzarov Buryat State University, ul. Smolina, 24a, Ulan-Ude, 670000 (Russia)

³ Institute of General and Experimental Biology Siberian Branch of RAS, ul. Sakhyanovoy, 6, Ulan-Ude, 670047 (Russia)

Ranunculus circinatus Sibth. is a boreal, Eurasian species. The content of heavy metals and the composition of fatty acids in *R. circinatus* from the Delta of the Selenga River, which is the main tributary of Lake Baikal, was studied for the first time in this paper. Plants of *R. circinatus* of the Selenga river delta accumulated heavy metals in significant quantities, mostly Fe and Mn, and the content of Pb and Cd was below detection limit. Palmitic C16:0, myristic C14:0 and stearic C18:0 acids were the main saturated fatty acids. The content of unsaturated acids ranged from 53.67 to 58.60%, and they were represented by acids of n3-, n6-, n7- and n9-families. Unsaturated linolenic 18:3 ω3, linoleic 18:2 ω6 and palmitoleic 16:1n7 acids were dominant regardless of the place and year of sampling. The presence of iso-, anteiso- and 2-hydroxy acids was associated with the growth of microbial communities on plants, when the presence of 17:1 n7 and 20:3 n6 acids were associated with animals in vegetation bed of *B. circinatus*. The obtained data confirmed that plants contribute to the operation of such a powerful natural biofilter as the delta of the Selenga River.

Keywords: *Ranunculus circinatus*, water plants, heavy metals, fatty acids, Baikal region, Delta, the Selenga River.

Referenses

1. Bánki O., Roskov Y., Döring M., Ower G., Vandepitte L., Hobern D., Remsen D., Schalk P., DeWalt R.E., Keping M., Miller J., Orrell T., Aalbu R., Adlard R., Adriaenssens E.M., Aedo C., Aeschl E., Akkari N., Alfenas-Zerbini P. et al. *Catalogue of Life Checklist (Version 2022-02-18)*. DOI: 10.48580/dfp4.
2. Lebedeva O.A., Lapirov A.G. *Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik (Yestestvennyye nauki)*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 55–60. (in Russ.).
3. Lebedeva O.A., Lapirov A.G. *Biologiya vnutrennikh vod*, 2009, no. 3, pp. 36–40. (in Russ.).
4. Movergoz Ye.A., Lapirov A.G., Lebedeva O.A. *Botanicheskiy zhurnal*, 2011, vol. 96, no. 6, pp. 794–804. (in Russ.).
5. Lebedeva O.A., Garin E.V., Belyakov Ye.A. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2015, no. 12-8, pp. 1442–1444. (in Russ.).
6. Azovskiy M.G., Chepinoga V.V. *Flora vysshikh rasteniy ozera Baykal*. [Flora of higher plants of Lake Baikal]. Irkutsk, 2007, 157 p. (in Russ.).
7. Bobrov A.A., Movergoz Ye.A. *Botanicheskiy zhurnal*, 2014, no. 3, pp. 325–339. (in Russ.).
8. Korytnyy L.M., Il'icheva Ye.A., Pavlov M.V. i dr. *Geografiya i prirodnyye resursy*, 2012, no. 3, pp. 47–54. (in Russ.).
9. *Del'ta reki Selengi kak yestestvennyy biofil'tr i indikator sostoyaniya ozera Baykal* [The delta of the Selenga River as a natural biofilter and indicator of the state of Lake Baikal], ed. A.K. Tulokhonov, A.M. Plyusnin. Novosibirsk, 2008, 314 p. (in Russ.).
10. Skyba O.I., Hrubinko V.V., Fedonyuk L.Ya. *Teoretychna Ekologiya*, 2018, no. 5, pp. 101–105. (in Ukr.).
11. Kirichenko K.A., Pobezhimova T.P., Sokolova N.A., Stolbikova A.V., Dudareva L.V., Voynikov V.K. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2011, no. 2, pp. 97–102. (in Russ.).
12. Zhigzhitzhapova S.V., Dylenova E.P., Anenkhonov O.A., Taraskin V.V., Radnaeva L.D. *Chemistry of Natural Compounds*, 2019, vol. 55, pp. 102–104.
13. Zhigzhitzhapova S.V., Pintava E.Ts., Dylenova E.P., Tykheev Zh.A., Radnaeva L.D. *Chemistry of Natural Compounds*, 2020, vol. 56, pp. 309–311.
14. Zhigzhitzhapova S.V., Dylenova E.P., Nikitina E.P., Tykheev Zh.A., Pintava E.Ts., Radnaeva L.D., Tsybekmitova G.Ts. *Chemistry of Natural Compounds*, 2021, vol. 57, pp. 743–745.
15. Shinkareva G.L., Lychagin M.Yu., Tarasov M.K., Pietron J., Chichayeva M.A., Chalov S.R. *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, vol. 12, pp. 240–263. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-103.
16. Kirichenko K.A. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. Ekologiya»*, 2013, vol. 6, no. 3(1), pp. 9–13. (in Russ.).
17. Kates M. *Techniques of Lipidology: Isolation, Analysis, and Identification of Lipids*. New York, 1972, 610 p.
18. Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Tyazhelye metally i rasteniya*. [Heavy metals and plants]. Petrozavodsk, 2014, 194 p. (in Russ.).
19. Il'icheva Ye.A. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, geografiya*, 2017, no. 4, pp. 64–73. (in Russ.).
20. Zhigzhitzhapova S.V., Pavlov I.A., Shiretorova V.G., Dylenova Ye.P., Radnayeva L.D., Tulokhonov A.K. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2019, no. 1-2, pp. 34–40. (in Russ.).
21. Shinkareva G.L. *Geokhimiya tyazhelykh metallov i metalloidov v komponentakh akval'nykh landshaftov basseyna r. Selengi: avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk*. [Geochemistry of heavy metals and metalloids in the components of the aquatic landscapes of the river basin. Selengi: author. dis. ... cand. geogr. Sciences]. Moscow, 2018, 24 p. (in Russ.).
22. Rozentsvet O.A., Fedoseyeva Ye.V., Terekhova V.A. *Uspekhi sovremennoy biologii*, 2019, vol. 139, no. 2, pp. 161–177. (in Russ.).

* Corresponding author.

23. *PlantFAdb database*. URL: https://plantfadb.org/fatty_acids.
24. Kuznetsova T.Yu., Titov A.F., Vetchinnikova L.V. *Fiziologiya rasteniy*, 2008, vol. 55, no. 5, pp. 731–737. (in Russ.).
25. Garmash Ye.V., Golovko T.K. *Fiziologiya rasteniy*, 2009, vol. 56, no. 3, pp. 382–387. (in Russ.).
26. Kvesitadze G.I., Khatishashvili G.A., Sadunishvili T.A., Yevstigneyeva Z.G. *Metabolizm antropogennykh toksikantov v vysshikh rasteniyakh*. [Metabolism of anthropogenic toxicants in higher plants]. Moscow, 2005, 199 p. (in Russ.).
27. Moiseyenko T.I. *Vodnaya ekotoksikologiya: teoreticheskiye i prikladnyye aspekty*. [Water ecotoxicology: theoretical and applied aspects]. Moscow, 2009, 400 p. (in Russ.).
28. Nesterov V.N., Rozentsvet O.A., Murzayeva S.V. *Fiziologiya rasteniy*, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 97–106. (in Russ.).
29. Kholodova V.P., Volkov K.S., Kuznetsov V.V. *Fiziologiya rasteniy*, 2005, vol. 52, no. 6, pp. 848–858. (in Russ.).

Received April 15, 2022

Revised May 25, 2022

Accepted May 26, 2022

For citing: Zhigzhitzhapova S.V., Dylenova E.P., Nikitina E.P., Shiretorova V.G., Abaturonov A.N., Anenkhonov O.A., Bazar-sadueva S.V., Radnaeva L.D. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 4, pp. 171–179. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20220411286.

