



УДК 577.115

## Изменения жирнокислотного состава высших водных растений реки Ангары под воздействием гипертермии и хлорида кадмия

К. А. Кириченко

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Иркутск  
E-mail: [kuzma@sifibr.irk.ru](mailto:kuzma@sifibr.irk.ru)

**Аннотация.** Методом хромато-масс-спектрометрии изучен жирнокислотный состав *Myriophyllum spicatum* и *Eloдея canadensis* из р. Ангары в нормальных условиях, а также под воздействием гипертермии и хлорида кадмия. Проведён сравнительный анализ содержания жирных кислот и вычислены значения индекса двойной связи. Жирнокислотный состав тканей исследованных видов был видоспецифичным и характеризовался относительно низким содержанием насыщенных жирных кислот. Основной насыщенной кислотой у обоих видов явилась пальмитиновая кислота (C16:0). Среди насыщенных жирных кислот были отмечены молекулы с нечётным числом атомов – пентадекановая (C15:0), гептадекановая (C17:0), а также генейкозановая кислота (C21:0), которая была обнаружена только в тканях *Eloдея canadensis*. Преобладали ненасыщенные жирные кислоты главными из которых были линолевая (C18:2n-6) и  $\alpha$ -линоленовая кислоты (C18:3n-3). Выявлены изменения в составе жирных кислот через 24 и 48 ч в ответ на воздействие токсиканта и гипертермии у исследованных видов.

**Ключевые слова:** *Myriophyllum spicatum*, *Eloдея canadensis*, высшие водные растения, Байкальский регион, гипертермия, хлорид кадмия, жирные кислоты.

### Введение

Высшие водные растения – важнейший компонент водных экосистем, являясь первопродукторами, наряду с водорослями поставляют вещество и энергию в экосистему водоёма, принимают участие в процессах обмена биогенных элементов, в самоочищении воды, поглощая и трансформируя токсиканты органической и неорганической природы. Они используются при биомониторинге состояния водоёмов и в процессе фиторемедиации загрязнённых вод [2–4; 8]. Исследования особенностей физиологических и биохимических процессов в тканях и клетках водных растений позволят разработать новые методы оценки качества и очистки воды.

Под воздействием факторов окружающей среды происходят изменения в липидном и жирнокислотном составе мембран растений, что отражается на ассоциированных с ними процессах жизнедеятельности. Сравнительное изучение липидного и жирнокислотного состава организмов позволяет выявить негативные сдвиги ещё до проявления морфологических и популяционных изменений [8; 10; 16; 18; 21].

Одним из распространённых в водоёмах поллютантов является кадмий, который относится к группе тяжёлых металлов, обладает

значительной токсичностью, подвижностью, проницаемостью и кумулятивностью и оказывает значительное влияние на организмы, обитающие в водоёмах с низкой минерализацией или пониженными значениями pH [5; 6; 10; 12].

Цель настоящего исследования – изучить и сравнить относительный состав жирных кислот тканей наиболее массовых видов высших водных растений реки Ангары при воздействии повышенной температуры и хлорида кадмия.

### Материалы и методы

Используемые в экспериментах макрофиты *Eloдея canadensis* Michx. и *Myriophyllum spicatum* L. собраны в августе-октябре 2010 и 2011 гг. в верхнем течении Ангары в литоральной зоне левобережья с глубины 1–2 м с использованием стандартных гидрботанических методов [14].

После культивирования в лабораторных условиях растения экспериментальной группы помещали в раствор хлорида кадмия (100 мг/л) на 24 и 48 ч. В другом опыте растения инкубировали 24 и 48 ч в дистиллированной воде, нагретой до 30 °С. Для анализа отбиралась усреднённая проба биомассы весом 1 г. Липиды экстрагировали смесью хлороформа и метанола (2:1). Анализ состава жирных кислот про-

водили после переэтерификации 5%-ным метанольным раствором  $H_2SO_4$  на водяной бане при  $60\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Анализ метиловых эфиров жирных кислот проводили методом газожидкостной хроматографии с использованием хромато-масс-спектрометра 5973N/6890N MSD/DS (Agilent Technologies, США). Относительное содержание жирных кислот определяли в весовых процентах от общего их содержания в исследуемом образце. Для оценки степени ненасыщенности жирных кислот рассчитывали индекс двойной связи (ИДС) как сумму произведений весовых процентов каждой ненасыщенной кислоты на число двойных связей в её молекуле, поделённую на 100, согласно методу, предложенному J. M. Lyons с соавторами [20]. Статистическую значимость различий в контрольной и экспериментальной выборках оценивали с помощью *T*-критерия Манна–Уитни [7].

### Результаты

Жирнокислотный состав исследованных видов носит видоспецифичный характер. Большинство жирных кислот содержит чётное число атомов углерода. Только среди насыщенных жирных кислот были отмечены молекулы с нечётным числом атомов – пентадека-

новая (C15:0), гептадекановая (C17:0), гениекозановая (C21:0). Суммарное содержание этих кислот составляло 0,32 % у *M. spicatum*, 0,80 % – у *E. canadensis*. Гениекозановая кислота была обнаружена только у *E. canadensis* (табл. 1, 2).

В условиях гипертермии ( $30\text{ }^\circ\text{C}$ ) состав жирных кислот у исследованных видов менялся незначительно (см. табл. 1, 2). У *E. canadensis* через 48 ч. гипертермии статистически значимо снизилось содержание пальмитиновой (C16:0) и пальмитолеиновой (C16:1) кислот, у *M. spicatum* – только последней. Содержание гениекозановой кислоты (C21:0) у *E. canadensis* уменьшилось до следовых количеств. В течение 24 ч воздействия количество насыщенных жирных кислот оставалось близким к контрольному, а через 48 ч наблюдалась тенденция к снижению их содержания у *M. spicatum* с 20,1 до 16,95 %, а у *E. canadensis* – с 24,39 до 23,17 %. Однако это не привело к статистически значимым изменениям индекса двойной связи. Содержание жирных кислот с нечётным числом атомов углерода практически не менялось. Значение индекса двойной связи оставалось на уровне, близком к контрольному.

Таблица 1

Состав жирных кислот (в весовых %) высших водных растений после экспозиции в условиях гипертермии ( $30\text{ }^\circ\text{C}$ )

Наименование жирных кислот	<i>M. spicatum</i>			<i>E. canadensis</i>		
	Контроль	Длит. экспозиции, ч		Контроль	Длит. экспозиции, ч	
		24	48		24	48
C14:0	0,34±0,10	0,28±0,02	0,32±0,06	0,48±0,23	0,70±0,58	0,29±0,03
C15:0	0,09±0,02	0,09±0,01	0,10±0,01	0,15±0,04	0,15±0,09	0,11±0,03
C16:0	17,95±2,37	18,55±1,09	15,14±1,03	19,85±1,80	20,83±5,98	17,49±1,37
C17:0	0,23±0,11	0,30±0,07	0,22±0,01	0,56±0,08	0,55±0,10	0,60±0,10
C18:0	1,24±0,70	1,07±0,17	0,96±0,17	2,63±0,77	2,74±0,88	3,77±0,86
C20:0	0,16±0,05	0,15±0,03	0,13±0,05	0,34±0,10	0,22±0,11	0,40±0,07
C21:0	–	–	–	0,13±0,01	–	–
C22:0	0,22±0,07	0,20±0,03	0,21±0,03	0,39±0,14	0,20±0,19	0,47±0,18
∑ C16:1	0,66±0,13	0,40±0,08	0,33±0,16	1,35±0,78	0,79±0,29	0,33±0,06
∑ C18:1	2,33±1,01	3,21±0,93	2,52±0,79	1,66±0,73	1,21±0,50	1,10±0,09
C18:2 (n-6)	26,22±5,20	31,81±3,99	28,23±3,96	18,58±2,76	19,53±1,78	18,95±1,81
C18:3 (n-3)	50,56±7,48	43,70±6,02	51,65±5,84	54,01±4,24	53,15±6,71	56,46±1,47
C20:1 (n-11)	0,25±0,09	0,31±0,26	–	–	–	–
ИДС	2,07±0,13	1,99±0,10	2,15±0,09	2,02±0,11	2,01±0,22	2,09±0,06
∑ нечёт	0,32±0,11	0,39±0,08	0,32±0,01	2,02±0,11	2,01±0,22	2,09±0,06

Примечание для табл. 1, 2: Приведена средняя арифметическая ± стандартное отклонение, n = 7 для контрольной и n = 4 для экспериментальной выборки; «–» кислота не обнаружена или присутствует в следовых количествах; \* – сумма изомеров пальмитолеиновой кислоты; \*\* – суммы цис-вакценовой и олеиновой кислоты. ИДС – индекс двойной связи. ∑ нечёт – сумма кислот с нечётным числом атомов.

Таблица 2

Состав жирных кислот (в весовых %) высших водных растений после экспозиции в растворе хлорида кадмия CdCl<sub>2</sub> (100 мг/л)

Наименование жирных кислот	<i>M. spicatum</i>			<i>E. canadensis</i>		
	Контроль	Длит. экспозиции, ч		Контроль	Длит. экспозиции, ч	
		24	48		24	48
C14:0	0,34±0,10	0,52±0,11	0,37±0,06	0,48±0,23	0,62±0,14	0,80±0,04
C15:0	0,09±0,02	0,18±0,05	0,13±0,03	0,15±0,04	0,31±0,09	0,58±0,06
C16:0	17,95±2,37	18,28±2,77	16,62±1,81	19,85±1,80	22,22±2,91	25,05±0,74
C17:0	0,23±0,11	0,19±0,04	0,21±0,07	0,56±0,08	0,79±0,21	0,94±0,07
C18:0	1,24±0,70	1,52±0,53	1,26±0,23	2,63±0,77	4,08±0,77	5,31±0,32
C20:0	0,16±0,05	0,14±0,07	0,15±0,05	0,34±0,10	0,48±0,11	0,81±0,05
C21:0	–	–	–	0,13±0,01	0,15±0,04	–
C22:0	0,22±0,07	0,22±0,05	0,30±0,07	0,39±0,14	0,50±0,19	0,93±0,12
∑ C16:1	0,66±0,13	0,79±0,23	0,58±0,26	1,35±0,78	1,76±0,64	2,48±0,17
∑ C18:1	2,33±1,01	3,00±1,40	2,27±0,60	1,66±0,73	2,50±1,04	3,02±0,49
C18:2 (n-6)	26,22±5,20	24,10±1,27	25,27±3,03	18,58±2,76	19,06±0,93	16,77±0,44
C18:3 (n-3)	50,56±7,48	50,97±5,95	52,48±5,15	54,01±4,24	47,51±5,01	43,14±1,30
C20:1 (n-11)	0,25±0,09	0,14±0,06	0,15±0,07	–	–	–
ИДС	2,07±0,13	2,05±0,14	2,12±0,10	2,02±0,11	1,85±0,14	1,14±0,04
∑ нечёт	0,32±0,11	0,37±0,07	0,34±0,09	0,80±0,16	1,26±0,31	1,52±0,12

Экспозиция исследованных видов в растворе хлорида кадмия (100 мг/л) в течение 24 и 48 ч также приводила к изменению в составе жирных кислот в их тканях. При действии хлорида кадмия содержание жирных кислот у *M. spicatum* оставалось близким к контрольному, статистически значимое увеличение содержания выявлено только для миристиновой (C14:0) и пентадекановой (C15:0) кислот через 24 ч воздействия токсиканта. Перераспределение относительного содержания насыщенных, моно- и полиненасыщенных жирных кислот у *M. spicatum* не сказывалось на значении индекса двойной связи.

Экспозиция *E. canadensis* в течение 48 ч в растворе хлорида кадмия приводила к статистически значимому увеличению содержания суммы изомеров пальмитоолеиновой (C16:1) и суммы *цис*-вакценовой (C18:1п-7) и олеиновой (C18:1п-9) кислот. Статистически значимо уменьшалось содержание α-линоленовой кислоты (C18:3п-3). Изменение массовых долей жирных кислот *E. canadensis* приводило к снижению индекса двойной связи, однако приобретало статистически значимый характер только после 48 ч воздействия хлорида кадмия.

### Обсуждение

Значительная часть физиологически важных процессов в организме растений (дыхание, фотосинтез, активный транспорт и др.) ассоциирована с клеточными мембранами и зависит от их функционального состояния. Для выполнения своих функций клеточные мембраны

должны иметь жидкокристаллическую структуру и обладать определённой степенью текучести и вязкости, которая зависит прежде всего от соотношения насыщенных и ненасыщенных жирных кислот, а также от степени ненасыщенности последних. Флуктуации условий окружающей среды вызывают изменения в структуре компонентов, а также функциональной активности мембран, что отражается на протекании всех физиологических процессов в клетке [11; 14; 17; 18; 21; 23]. У исследованных видов выявлены различия в составе жирных кислот в условиях воздействия гипертермии и хлорида кадмия. Характер произошедших изменений был видоспецифичен и зависел от типа воздействия.

Температура является одним из самых важных абиотических факторов. Растения как пойкилотермные организмы в процессе эволюции выработали различные механизмы адаптации к изменениям температурных условий окружающей среды [1; 8; 9; 22]. Выявлено, что температура 30 °C не приводила к значительным изменениям в составе жирных кислот у исследованных видов. Вероятно, величина воздействия данной температуры недостаточна, чтобы значительно повлиять на активность десатураз. Возможно, это связано с тем, что в диапазоне температур 20–35 °C не происходит фазового перехода и существенного изменения молекулярной подвижности мембранных липидов [11].

Наличие соединений кадмия в воде негативно сказывается на физиологическом состоянии гидробионтов [12]. Показано, что влияние

тяжёлых металлов, в том числе кадмия, подавляет рост растений, негативно сказывается на их развитии, нарушает процессы транспорта ассимилятов и минерального питания, влияет на водный и гормональный обмен, снижает активность фотосинтеза и дыхания [5; 6; 10; 12]. Вероятно, выявленные изменения состава жирных кислот у исследованных видов связаны с воздействием кадмия на процессы жизнедеятельности, в частности, на метаболизм липидов.

Одним из механизмов токсического действия тяжёлых металлов является их соединение с SH-группами белков и инициация перекисного и свободнорадикального окисления. Под воздействием тяжёлых металлов нарушаются функции мембран, показателем их трансформации служат изменения в составе жирных кислот [5; 6; 13; 15; 16]. Можно предположить, что действие токсиканта на метаболизм липидов каждого вида имеет свои особенности. Мембраны *E. canadensis*, вероятно, подвергаются более глубоким модификациям по сравнению с *M. spicatum*, так как у данного вида происходит достоверное снижение содержания линоленовой кислоты (C18:3 $\omega$ 3). Снижение доли этой кислоты может быть обусловлено активацией перекисного окисления липидов, снижением активности дыхания или совместным влиянием обоих факторов. У данного вида также достоверно увеличивается содержание пентадекановой (C15:0), стеариновой (C18:0) и арахидиновой (C20:0) кислот, уменьшается показатель индекса двойной связи. Стоит также отметить значимое увеличение содержания жирных кислот с нечётным числом углеродных атомов. Синтез этих кислот идёт через пропионил-кофермент А. Вероятно, метаболизм жирных кислот у *E. canadensis* претерпевает значительные изменения, которые сказываются даже на синтезе жирных кислот через пропионил-КоА [19]. В то же время жирнокислотный состав *M. spicatum* остаётся более стабильным, а метаболизм липидов, вероятно, в меньшей степени подвержен влиянию хлорида кадмия. Известно, что данный вид рекомендован для фиторемедиации от загрязнения тяжёлыми металлами, в том числе кадмием [10].

### Заключение

Изменение состава жирных кислот у исследованных макрофитов *M. spicatum* и *E. canadensis* под воздействием раствора хлорида кадмия при экспозиции 24 и 48 ч происходит по-разному. Менее выражены эти изменения у *M. spicatum*, состав жирных кислот ко-

торого в целом оказался более стабильным к воздействию токсиканта. Выявленные особенности свидетельствуют в пользу существования отличий в метаболизме жирных кислот у *E. canadensis*. Данный вид, эволюционировавший в Северной Америке, является заносным для Евразии и обладает ярко выраженной инвазионностью. За короткий исторический период он сумел широко распространиться, вытеснив местную растительность во многих водоёмах [17]. Возможно, вид столь успешно расселился за счёт специфических особенностей обмена веществ.

Характерный профиль жирных кислот суммарных липидов и различия в показателе индекса двойной связи можно, вероятно, объяснить особенностями их метаболизма у каждого из исследованных видов. Межвидовые различия в данном случае проявлялись не только на морфологическом уровне, но и в специфике обмена жирных кислот. Знание специфики метаболизма водных растений позволит более широко использовать их для эколого-биохимического мониторинга состояния водоёмов. В связи с этим выявленные биохимические отличия стоит учитывать при разработке методов оценки качества и очистки загрязнённой воды.

Публикация статьи осуществлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 13-04-06068-г.

### Литература

1. Афанасьева Н. Б. Введение в экологию растений / Н. Б. Афанасьева, Н. А. Березина. – М.: Изд-во МГУ, 2011. – 800 с.
2. Бакаева Е. Н. Гидробионты в оценке качества вод суши / Е. Н. Бакаева, А. Н. Никаноров. – М.: Наука, 2006. – 239 с.
3. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование / под ред. О. П. Мелиховой. – М.: Академия, 2008. – 288 с.
4. Бреховских В. Ф. Биота в процессах массопереноса в водных объектах / В. Ф. Бреховских, В. Д. Казьмирук, Г. Н. Вишневецкая. – М.: Наука, 2008. – 315 с.
5. Влияние кадмия на состав жирных кислот липидов в побегах карельской берёзы *in vitro* / Т. Ю. Кузнецова [и др.] // Физиология растений. – 2008. – Т. 55, № 5. – С. 731–737.
6. Гармаш Е. В. Влияние кадмия на рост и дыхание ячменя при двух температурных режимах выращивания / Е. В. Гармаш, Т. К. Головкин // Физиология растений. – 2009. – Т. 56, № 3. – С. 382–387.
7. Гланц С. Медико-биологическая статистика / С. Гланц. – М.: Практика, 1998. – 459 с.

8. Ипатова В. И. Адаптация водных растений к стрессовым абиотическим факторам среды / В. И. Ипатова – М. : Графикон-принт, 2005. – 224 с.
9. Карпец Ю. В. Ответ растений на гипертермию: молекулярно-клеточные аспекты / Ю. В. Карпец, Ю. Е. Колупаев // Вестн. Харьк. нац. аграр. ун-та. Сер. Биология. – 2009. – Вып. 1. – № 16. – С. 19–38.
10. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях / Г. И. Квеситадзе [и др.]. – М. : Наука, 2005. – 199 с.
11. Лось Д. А. Структура, регуляция экспрессии и функционирование десатураз жирных кислот / Д. А. Лось // Успехи биол. химии. – 2001. – Т. 41. – С. 163–198.
12. Моисеенко Т. И. Водная экотоксикология: теоретические и прикладные аспекты / Т. И. Моисеенко. – М. : Наука, 2009. – 400 с.
13. Нестеров В. Н. Изменение состава липидов у пресноводного растения *Hydrilla verticillata* при накоплении и удалении из тканей ионов тяжелых металлов / В. Н. Нестеров, О. А. Розенцвиг, С. В. Мурзаева // Физиология растений. – 2009. – Т. 56, № 5. – С. 97–106.
14. Садчиков А. П. Гидророботаника: Прибрежно-водная растительность : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А. П. Садчиков, М. А. Кудряшов. – М. : Академия, 2005. – 240 с.
15. Холодова В. П. Адаптация к высоким концентрациям солей меди и цинка растений хрустальной травки и возможность их использования в целях фиторемедиации / В. П. Холодова, К. С. Волков, Вл. В. Кузнецов // Физиология растений. – 2005. – Т. 52, № 6. – С. 848–858.
16. Чиркова Т. В. Клеточные мембраны и устойчивость растений к стрессовым воздействиям / Т. В. Чиркова // Сорос. образоват. журн. – 1997. – № 9. – С. 12–17.
17. Barrat-Segretain M-H. Experiments on growth interactions between two invasive macrophyte species / M-H. Barrat-Segretain, A. Elger // Journal of Vegetation Science. – 2004. – Vol. 15, I. 1. – P. 109–14.
18. Eeman M. From biological membranes to biometric model membranes / M. Eeman, M. Deleu // Biotechnol. Agron. Soc. Environ. – 2010. – Vol. 14, I. 4. – P. 719–736.
19. Gunstone F. D. Fatty acid and lipid chemistry / F. D. Gunstone. – London : Blackie Academic and Professional, 1996. – 252 p.
20. Lyons J. M. Relationship between the physical nature of mitochondrial membranes and chilling sensitivity in plant / J. M. Lyons, T. A. Wheaton, H. K. Pratt // Plant Physiology. – 1964. – Vol. 39. – P. 262–268.
21. Role of lipids and fatty acids in stress tolerance in cyanobacteria / S. C. Singh, R. P. Sinha, D.-P. Häder // Acta Protozool. – 2002. – Vol. 41. – P. 297–308.
22. Sham A. Bioinformatics based comparative analysis of omega-3 fatty acids in desert plants and their role in stress resistance and tolerance / A. Sham, M. A. M. Aly // International Journal of Plant Research. – 2012. – Vol. 2, I. 3. – P. 80–89.

## Fatty acid composition changes in high aquatic plants from the Angara River under the influence of hyperthermia and cadmium chloride

K. A. Kirichenko

*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk*

**Abstract.** The fatty acid composition of two species of aquatic plants *Myriophyllum spicatum*, *Elodea canadensis* from the Angara River both under normal conditions and under the influence of hypothermia (30 °C) and cadmium chloride (100 mg/l) was studied by chromatography-mass-spectrometry. A comparative analysis of the fatty acid content and the values of the double bond index were carried out. Fatty acid composition of tissues studied species was species-specific and characterized by a relatively low content of saturated fatty acids. The main saturated acid in both species was palmitic acid (C16:0). Among the saturated fatty acids have been marked molecule with an odd number of carbon atoms – pentadecanoic (C15:0), heptadecanoic (C17:0) and heneicosanoic acid (C21:0). Heneicosanoic acid was found only in the tissues *Elodea canadensis*. The most amount of unsaturated fatty acids were accounted for linoleic (C18:2n-6) and  $\alpha$ -linolenic acid (C18:3n-3). The changes in the composition of fatty acids after 24 and 48 hours in response to the factors tested are shown. The differences in fatty acid composition changes in response to exposure to cadmium chloride and hyperthermia in the species studied have been found.

**Keywords:** *Myriophyllum spicatum*, *Elodea canadensis*, high aquatic plants, Baikal region, hyperthermia, cadmium chloride, fatty acids.

*Кириченко Кузьма'Анатольевич*  
кандидат биологических наук, научный сотрудник  
Сибирский институт физиологии и биохимии  
растений СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132  
тел. (3952) 42-46-59  
E-mail: kuzma@sifibr.irk.ru

*Kirichenko Kuz'ma'Anatolyevich*  
Ph. D. in Biology, Research Scientist  
Siberian Institute of Plant Physiology  
and Biochemistry SB RAS  
132 Lermontov st., Irkutsk, 664032  
tel.: (3952) 42-46-59  
E-mail: kuzma@sifibr.irk.ru