

Оригинальная статья

УДК 57.033

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-3-310-318>

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ

Г. В. Лобкова, Е. И. Тихомирова , З. А. Симонова

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Поступила в редакцию 14.06.2021 г., после доработки 15.07.2021 г., принята 23.07.2021 г.

Аннотация. Проведена оценка состояния фотосинтетических пигментов у водных растений *Lemna minor* L. и *Elodea canadensis* Michx. при действии на них ацетатов Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} в концентрациях 5.00, 2.50, 1.25, 0.62, 0.31, 0.15, 0.07, 0.03 мг/л по изменению интенсивности флуоресценции хлорофиллов *a* и *b* и по их соотношению. Установлено, что ацетат никеля в исходных растворах во всех вышеперечисленных концентрациях вызывает у *L. minor* увеличение интенсивности флуоресценции хлорофиллов *a* и *b* по отношению к контролю, а соль свинца подавляет её. Ацетат Co^{2+} ингибирует флуоресценцию хлорофилла *a* при концентрациях исходных растворов 0.03 – 0.15 и 2.50 мг/л и хлорофилла *b* при всех концентрациях, кроме 0.62, 1.25 и 2.50 мг/л. Для *E. canadensis* установлено, что соли всех металлов во всех концентрациях вызывают снижение интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* относительно контроля и увеличивают её в случае хлорофилла *b*. Исключение составляет действие ацетатов меди и свинца с концентрацией 1.25 мг/л, при которых интенсивность флуоресценции хлорофилла *b* сохраняется на уровне контроля. Присутствие в культивационной среде ацетатов Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} во всех концентрациях оказывает влияние на количественные и качественные характеристики хлорофиллов *a* и *b*, что свидетельствует о нарушении процесса фотосинтеза. Данные по изменению соотношения хлорофиллов *a/b* позволяют сделать вывод о деградации хлорофилла *a* по отношению к хлорофиллу *b* при воздействии металлов.

Ключевые слова: *Lemna minor*, *Elodea canadensis*, тяжелые металлы, фотосистемы I и II, интенсивность флуоресценции, соотношение хлорофиллов *a / b*

Финансирование. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-64-46018).

Для цитирования. Лобкова Г. В., Тихомирова Е. И., Симонова З. А. Оценка воздействия солей тяжелых металлов на фотосинтетическую активность водных растений // Поволжский экологический журнал. 2021. № 3. С. 310 – 318. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-3-310-318>

 Для корреспонденции. Кафедра «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

ORCID и e-mail адреса: Лобкова Галина Викторовна: <https://orcid.org/0000-0002-4054-2934>, galinlobkova@ya.ru; Тихомирова Елена Ивановна: <https://orcid.org/0000-0001-6030-7344>, tichomirova_ei@mail.ru; Симонова Зоя Александровна: <https://orcid.org/0000-0002-2353-1547>, simonovaza@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Обязательным условием существования любого живого организма является активный обмен веществом и энергией с внешней средой. В состав поглощаемых растениями веществ могут входить тяжелые металлы (ТМ) – Hg, Pb, Cu, Cd, Ni, Co, Sn, Mn, As, Fe, Zn, Cr и др., используемые в качестве микроэлементов (Nagajyoti et al., 2010). При этом в среде металлы могут иметь концентрации, значительно превышающие необходимые для нормального существования организмов. В этом случае одни виды растений, не справляясь с такой нагрузкой, погибают, у других – включаются защитные механизмы (Dubey, 2011), приводящие к накоплению в различных органах и тканях металлов, причем часто их содержание в растениях становится выше, чем в среде обитания (Екпо et al., 2012).

Для оценки состояния и продуктивности растительных систем, устойчивости их фотосинтетического аппарата по отношению к неблагоприятным факторам окружающей среды используют флуоресцентные методы исследования, основанные на изменении интенсивности конкретных веществ. Актуальность применения этого метода связана с хорошей флуоресценцией, например, полиненасыщенных, конденсированных, ароматических и полиароматических соединений, а также удобным временным диапазоном, так как испускание флуоресценции происходит через 10^{-8} с после поглощения света. В меньшей степени флуоресценция свойственна природным соединениям. К природным флуорофорам относятся белки, нуклеиновые кислоты, коферменты и витамины, продукты окисления и пигменты.

Фотосинтезирующие организмы содержат хлорофилл *a*, который находится в реакционных центрах фотосистем и в антенных комплексах (периферических антеннах ФС II и I), тогда как хлорофилл *b* является компонентом светособирающих антенных комплексов (ССК). Постоянное соотношение хлорофилла *a* / *b* свидетельствует о неизменности стехиометрического соотношения комплексов реакционных центров фотосистем и ССК (Lindahl et al., 1995). Изменения в соотношении хлорофилла *a* / *b* является показателем функционального пигментного пула и часто используется в качестве индикатора стресса или повреждения фотосинтетического аппарата (Filimon et al., 2015).

При нарушении состояния фотохимических мембран реакционные центры (РЦ) фотосистем переходят в неактивное («закрытое») состояние и происходит прекращение потока электронов от РЦ далее по электрон-транспортной цепи (ЭТЦ). В этих условиях поглощенная энергия света не может использоваться в фотосинтезе, а рассеивается в виде флуоресценции, поэтому флуоресценция хлорофилла возрастает (Маторин, Рубин, 2012; Рубин, 2013).

Имея определенные преимущества, флуоресцентные методы позволяют просто и экономично решать многие задачи экологического контроля, физико-химического анализа и диагностики состояния систем растительных организмов.

Цель данной работы – изучить воздействие ионов Pb^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} на интенсивность флуоресценции хлорофиллов *a* и *b* у водных растений *Lemna minor* L. и *Elodea canadensis* Michx. и по соотношению содержания хлорофиллов *a* / *b* оценить фотосинтетическую активность растений и степень взаимодействия хлорофиллов со светособирающим хлорофилл *a* / *b* белковым комплексом (СХБК).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для исследования использовали водные растворы $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ с концентрациями 5.00, 2.50, 1.25, 0.62, 0.31, 0.15, 0.07, 0.03 мг/л, приготовленные последовательным разбавлением. Выбор данных солей обусловлен, во-первых, тем, что они имеют разные катионы и одинаковые анионы, это позволяет свести к минимуму влияние последних на изучаемые процессы; во-вторых, Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} и Pb^{2+} относятся к приоритетным загрязнителям.

Образцы высших водных растений культивировались в течение семи дней – *L. minor* на среде Гапоненко – Стажецкого, *E. canadensis* на среде Успенского. Затем жизнеспособные экземпляры *L. minor*, имеющие по одному сформированному и одному развивающемуся листу, и побеги *E. canadensis* длиной около 5 см помещали в растворы солей. Опыт проводился в течение 14 суток при естественном освещении и температуре $+24 - 25^\circ\text{C}$ в трех повторностях. Тестируемые растворы меняли каждые 3 дня. По окончании срока культивации измеряли интенсивность флуоресценции.

Для определения концентрации хлорофиллов *a* и *b* из навески листовых пластинок пигменты экстрагировали безводным диэтиловым эфиром и регистрировали спектры флуоресценции. Люминесцентный анализ проводили на приборе спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (Люмекс, Санкт-Петербург, Россия) при трех длинах волн: 600 нм (уровень фона), 646 нм (флуоресценция хлорофилла *b*), 666 нм (флуоресценция хлорофилла *a*).

Подготовительную обработку и анализ данных проводили в приложении Microsoft Office Excel 2010 (Microsoft Corp.), статистические расчеты выполнены с использованием пакета прикладных программ STATISTICA 6.0 (Statsoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе исследований данные по зависимости интенсивности флуоресценции хлорофиллов *a* и *b* у *L. minor* от концентрации ионов ТМ представлены на рис. 1, из которого видно, что изучаемый показатель носит нелинейный характер и имеет синхронные смещения.

Содержание соли никеля в исходных растворах во всех вышеперечисленных концентрациях вызывает увеличение интенсивности флуоресценции хлорофиллов *a* и *b* по отношению к контролю, а соль свинца подавляет её.

Ацетат Co^{2+} снижает флуоресценцию хлорофилла *a* при концентрациях исходных растворов 0.03 – 0.15 и 2.50 мг/л и хлорофилла *b* при всех концентрациях, кроме 0.62, 1.25 и 2.50 мг/л. Для ацетата меди характерны максимумы флуоресценции хлорофиллов *a* и *b* при концентрациях 0.03, 0.15, 1.25 и 2.50 мг/л. В то же время концентрация соли 0.07 мг/л вызывает значительное снижение интенсивности флуоресценции обоих хлорофиллов.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что исследуемые соли вызывают нарушения в процессе фотосинтеза, как в ходе превращения энергии на этапе кислородного фотосинтеза, в котором участвует хлорофилл *a*, так и в функ-

ционировании светособирающих антенных комплексов, в состав которых входят хлорофиллы *a* и *b*.

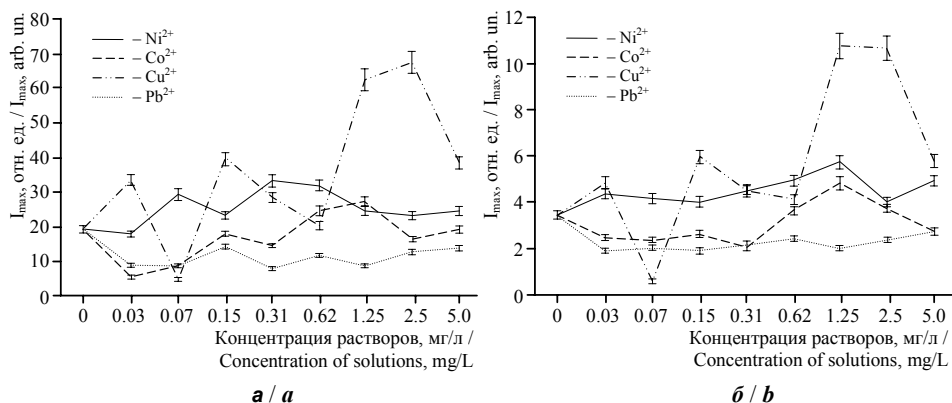


Рис. 1. Зависимость интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* (а) и хлорофилла *b* (б) у растения *Lemna minor* от концентрации ацетатов Ni²⁺, Co²⁺, Cu²⁺, Pb²⁺
Fig. 1. Dependence of the fluorescence intensity of chlorophyll *a* (a) and chlorophyll *b* (b) in the *Lemna minor* plant on the concentration of Ni²⁺, Co²⁺, Cu²⁺ and Pb²⁺ acetates

Известно, что в присутствии солей меди, никеля, свинца нарушается биосинтез хлорофилла, в молекулах которого ионы этих металлов вытесняют Mg²⁺ (Курпер et al., 1996). Описано также, что соли меди в больших концентрациях замедляют связывание молекул хлорофиллов с белками в светособирающих комплексах фотосистем (Головки и др., 2008; Косицына и др., 2010).

Для растения *E. canadensis* установлено, что соли всех металлов во всех концентрациях вызывают снижение интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* относительно контроля (рис. 2, а) и увеличивают её в случае хлорофилла *b* (рис. 2, б). Исключение составляет действие ацетатов меди и свинца с концентрацией 1.25 мг/л, при которых интенсивность флуоресценции хлорофилла *b* сохраняется на уровне контроля.

Значительное увеличение интенсивности флуоресценции хлорофилла *b* свидетельствует о серьезных нарушениях в функционировании в светособирающих антенных комплексах (Абрамова, Иванищев, 2012). Для погруженной *E. canadensis* это особенно актуально, так как в условиях дефицита света хлорофилл *b* в составе ССК1, ССК2 и малой антенны участвует в увеличении светосбора на низком свете и в диссипации избытка поглощенной световой энергии на высоком свете (Voitsekhovskaja, Tyutereva, 2015).

Разница результатов по интенсивности флуоресценции двух водных растений, вероятно, связана с особенностями светопоглощения плавающего (*L. minor*) и погруженного (*E. canadensis*) растений и, соответственно, различного механизма действия на них ТМ. Причем для погруженного растения (в условиях дефицита света) интенсивность флуоресценции в большей степени зависит от природы и концентрации ионов металлов, чем для плавающего.

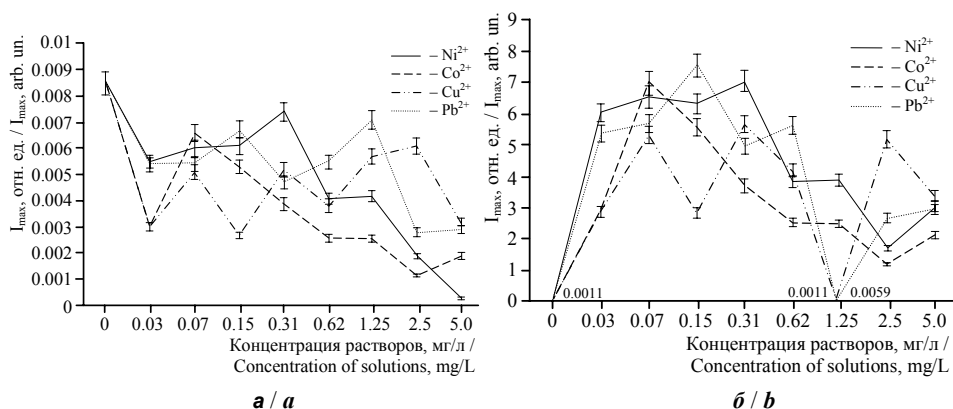


Рис. 2. Зависимость интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* (а) и хлорофилла *b* (б) у растения *Elodea canadensis* от концентрации ацетатов Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} .

Fig. 2. Dependence of the fluorescence intensity of chlorophyll *a* (a) and chlorophyll *b* (b) in the *Elodea canadensis* plant on the concentration of Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} and Pb^{2+} acetates

Далее было определено соотношение концентраций хлорофиллов *a* / *b*. В таблице представлены данные по соотношению хлорофиллов *a* / *b* для растений *L. minor* и *E. canadensis*.

Количественное соотношение хлорофиллов *a* / *b* в листьях растений *Lemna minor*, *Elodea canadensis* при действии на них ацетатов ТМ

Table. Quantitative chlorophyll *a* / *b* ratio in the leaves of *Lemna minor* and *Elodea canadensis* plants under the action of HM acetates thereon

Начальная концентрация растворов солей, мг/л / Initial concentration of salt solutions, mg/L	Количественное соотношение хлорофиллов <i>a</i> / <i>b</i> / Quantitative chlorophyll <i>a</i> / <i>b</i> ratio							
	<i>Lemna minor</i>				<i>Elodea canadensis</i>			
	Ni^{2+}	Co^{2+}	Cu^{2+}	Pb^{2+}	Ni^{2+}	Co^{2+}	Cu^{2+}	Pb^{2+}
Контроль / Control	1:2.5	1:2.5	1:2.5	1:2.5	1:2.5	1:2.5	1:2.5	1:2.5
0.03	1:2.9	1:2.8	1:2.8	1:3.6	1:1.8	1:1.5	1:9.0	1:52.0
0.07	1:2.8	1:2.9	1:3.5	1:3.6	1:1.8	1:1.3	1:3.0	1:16.7
0.15	1:2.6	1:2.8	1:3.1	1:3.6	1:1.7	1:1.5	1:3.8	1:74.3
0.31	1:2.9	1:2.8	1:3.0	1:3.6	1:1.3	1:2.0	1:3.1	1:16.0
0.62	1:2.9	1:2.9	1:2.9	1:3.0	1:1.6	1:1.3	1:2.8	1:58.0
1.25	1:3.0	1:2.9	1:3.1	1:3.0	1:1.5	1:2.1	1:3.0	1:25.4
2.50	1:2.9	1:2.8	1:2.8	1:3.4	1:1.7	1:1.7	1:2.8	1:31.2
5.00	1:2.9	1:2.8	1:3.0	1:3.4	1:1.7	1:1.8	1:3.3	1:68.7

Результаты, представленные в таблице, указывают на то, что в присутствии солей тяжелых металлов у плавающего растения *L. minor* количество хлорофилла *b* увеличивается по отношению к хлорофиллу *a* во всех исследуемых растворах, что свидетельствует о деградации хлорофилла *a* по отношению к хлорофиллу *b* при воздействии металлов, которые могли привести к деградации хлорофилла *a* в РЦ или антенне. Снижение содержания хлорофилла *a* является частым признаком токсичности тяжелых металлов (Tremper et al., 2004). Полученные результаты со-

гласуются с данными авторов (Chettri et al., 1998), которые обнаружили уменьшение отношения хлорофилла a/b у лишайников при воздействии тяжелых металлов и предположили, что уменьшение содержания хлорофилла a может быть объяснено превращением хлорофилла a в хлорофилл b в результате окисления метильной группы кольца II до альдегида при воздействии металлов.

У погруженного растения *E. canadensis* отклик на действие ацетатов никеля и кобальта проявляется в снижении количественных показателей хлорофилла b при всех концентрациях, включая высокие, что согласуется с данными авторов, описывающих реакцию водных растений на действие солей этих металлов (Patnaik et al., 2012).

В присутствии ионов Cu^{2+} и Pb^{2+} количество хлорофилла b относительно хлорофилла a возрастает, при этом у *E. canadensis*, культивируемой в растворах ацетата свинца, этот показатель изменяется на порядок. Похожие результаты были получены Е. Н. Еськовой (2014). Поскольку хлорофилл b сосредоточен только в антенне фотосинтетического аппарата, где не только участвует в процессах поглощения и миграции энергии, но также выступает в качестве основного регулятора ее размера, то изменение содержания антенных белков ведет к изменению соотношения хлорофиллов a/b (Тютерева и др., 2017). Исходя из этого, можно предположить, что ионы Cu^{2+} и Pb^{2+} оказывают непосредственное влияние на структуру антенных белков. При этом у *E. canadensis* наблюдаются адаптационные ответы, направленные на компенсацию дефицита поступающей энергии за счет увеличения количества молекул хлорофилла b , который может образовываться, в том числе, из хлорофилла a под действием хлорофилл- a -оксигеназы (Тютерева и др., 2017) и который способен поглощать свет в коротковолновой области (425 – 475 нм), слабо поглощаемый хлорофиллом a . То есть увеличение количества хлорофилла b обеспечивает повышение светосбора при нарушении под действием ионов ТМ функционального состояния ССК1, ССК2 и малой антенны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что люминесцентные методы исследования позволяют оценить действие ТМ на фотосинтетические пигменты растений. Присутствие в культивационной среде ацетатов Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} во всех исследуемых концентрациях оказывает влияние на количественные и качественные характеристики хлорофиллов a и b , что свидетельствует о нарушении процесса фотосинтеза. Тяжелые металлы оказывают отрицательное влияние на световые реакции фотосинтеза и на структурную целостность фотосистем. Данные по изменению соотношения хлорофиллов a/b позволяют сделать вывод о деградации хлорофилла a по отношению к хлорофиллу b при воздействии металлов.

Изучение флуоресценции позволяет получить информацию о структурных перестройках мембран хлоропластов, следить за состоянием реакционных центров фотосистем у фотосинтезирующих организмов, а метод флуоресцентного анализа может быть использован для экологического мониторинга водных сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова Э. А., Иванищев В. В. Содержание фотосинтетических пигментов и аскорбиновой кислоты в проростках вики в присутствии хлорида никеля // Научные ведомости. Сер. Естественные науки. 2012. № 9. С. 152 – 155.
- Головки Т. К., Далькэ И. В., Бачаров Д. С. Мезоструктура и активность фотосинтетического аппарата трех видов растений сем. Crassulaceae в холодном климате // Физиология растений. 2008. Т. 55, № 5. С. 671 – 680.
- Еськова Е. Н. Влияние свинца на содержание хлорофилла в листьях ярового ячменя // Экология, окружающая среда и здоровье человека : XXI век. Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т., 2014. С. 126 – 128.
- Косицына А. А., Макурина О. Н., Нестеров В. Н., Розенцвиг О. А. Влияние ионов меди и кадмия на пигментный комплекс водных растений семейства *Hydrocharitaceae* // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 1. С. 156 – 161.
- Маторин Д. Н., Рубин А. Б. Флуоресценции хлорофилла высших растений и водорослей. Ижевск ; М. : Ижевский институт компьютерных исследований, 2012. 256 с.
- Рубин А. Б. Биофизика : в 3 т. Т. III. Биофизика клеточных процессов. Механизмы первичных фотобиологических процессов. М. : Ин-т компьютерных исследований, 2013. 480 с.
- Тютерева Е. В., Дмитриева В. А., Войцеховская О. В. Хлорофилл *b* как источник сигналов, регулирующих развитие и продуктивность растений (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52, № 5. С. 843 – 855.
- Chettri M. K., Cook C. M., Vardaka E., Sawidis T., Lanaras T. The effect of Cu, Zn and Pb on the chlorophyll content of the lichens *Cladonia convoluta* and *Cladonia rangiformis* // Environmental and Experimental Botany. 1998. Vol. 39, iss. 1. P. 1 – 10.
- Dubey R. S. Metal toxicity, oxidative stress and antioxidative defense system in plants // Reactive Oxygen Species and Antioxidants in Higher Plants / ed. S. D. Gupta. Boca Raton : CRC Press, 2011. P. 177 – 203.
- Ekpo F. E., Nzegblue E. C., Asuquo M. E. A comparative study of the influence of heavy metals on soil and crops growing within quarry environment at Akamkpa, Cross River State, Nigeria // Global Journal of Agricultural Sciences. 2012. Vol. 11, № 1. P. 1 – 4.
- Filimon R. V., Rotaru L., Filimon R. M. Quantitative investigation of leaf photosynthetic pigments during annual biological cycle of *Vitis vinifera* L. table grape cultivars // South African Journal Enology and Viticulture. 2016. Vol. 37, № 1. P. 1 – 14.
- Kupper H., Kupper F., Spiller M. Environmental relevance of heavy metal substituted chlorophylls using the example of water plants // Journal of Experimental Botany. 1996. Vol. 47, iss. 2. P. 259 – 266.
- Lindahl M., Yang D.-H., Anderson B. Regulatory proteolysis of the major light-harvesting chlorophyll *a* / *b* protein complex of photosystem II by a light-induced membrane associated enzymic system // European Journal of Biochemistry. 1995. Vol. 231, iss. 2. P. 503 – 509.
- Nagajyoti P. C., Lee K. D., Sreekanth T. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants : A review // Environmental Chemistry Letters. 2010. Vol. 8, iss. 3. P. 199 – 216.
- Patnaik N., Mohanty M., Satpathy B. Effect of chelating agents and metal ions on nickel bioavailability and chlorophyll fluorescence response in wheat – An approach for attenuation of Ni stress // Journal of Stress Physiology & Biochemistry. 2012. Vol. 8, iss. 3. P. 99 – 112.
- Tremper A. H., Agneta M., Burton S., Higgs D. E. B. Field and laboratory exposures of two moss species to low level metal pollution // Journal of Atmospheric Chemistry. 2004. Vol. 49, iss. 1 – 3. P. 111 – 120.
- Voitsekhovskaja O. V., Tyutereva E. V. Chlorophyll *b* in angiosperms : Functions in photosynthesis, signaling and ontogenetic regulation // Journal of Plant Physiology. 2015. Vol. 189. P. 51 – 64.

Assessment of the effect of heavy metal salts on the photosynthetic activity of aquatic plants

G. V. Lobkova, E. I. Tikhomirova , Z. A. Simonova

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

Received: 14 June 2021 / revised: 15 July 2021 / accepted: 23 July 2021

Abstract. The status of the photosynthetic pigments in the aquatic plants *Lemna minor* L. and *Elodea canadensis* Michx. under the action of Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} and Pb^{2+} acetate in concentrations 5.00, 2.50, 1.25, 0.62, 0.31, 0.15, 0.07, and 0.03 mg/L was assessed by changes in the fluorescence intensity of chlorophyll *a* and *b* and their ratio. It was established that nickel acetate in original solutions in all the above concentrations caused an increase in the fluorescence intensity of chlorophylls *a* and *b* in *L. minor* in relation to the control while the lead salt suppressed it. Co^{2+} acetate inhibits the fluorescence of chlorophyll *a* with concentrations in the initial solutions of 0.03 to 0.15 and 2.50 mg/L and that of chlorophyll *b* at all concentrations, except 0.62, 1.25 and 2.50 mg/L. For *E. canadensis* it was found that the salts of all metals at all concentrations caused a reduction of the fluorescence intensity of chlorophyll *a* relative to the control and increased it in the case of chlorophyll *b*. The exception is the effect of copper and lead acetates with a concentration of 1.25 mg/L, when the fluorescence intensity of chlorophyll *b* is maintained at the control level. The presence of Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , and Pb^{2+} acetates in all concentrations in the culture medium influences the quantitative and qualitative characteristics of chlorophyll *a* and *b*, which indicates a violation of the photosynthesis process. Our data on the change in the chlorophyll *a* / *b* ratio leads to a conclusion about degradation of chlorophyll *a* relative to chlorophyll *b* after the effect of heavy metals.

Keywords: *Lemna minor*, *Elodea canadensis*, heavy metals, photosystem I and II, fluorescence intensity, the chlorophyll *a* / *b* ratio

Funding. The reported study was funded by Russian Science Foundation (project number 20-64-46018).

For citation: Lobkova G. V., Tikhomirova E. I., Simonova Z. A. Assessment of the effect of heavy metal salts on the photosynthetic activity of aquatic plants. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2021, no. 3, pp. 310–318. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-3-310-318>

REFERENCES

Abramova E. A., Ivanishchev V. V. The content of photosynthetic pigments and ascorbic acid in vetch seedlings in the presence of nickel chloride. *Belgorod State University Scientific Bulletin, Natural Sciences*, 2012, no. 9, pp. 152–155 (in Russian).

 *Corresponding author.* Department Ecology and Technosphere safety, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Galina V. Lobkova: <https://orcid.org/0000-0002-4054-2934>, galinlobkova@ya.ru; Elena I. Tikhomirova: <https://orcid.org/0000-0001-6030-7344>, tichomirova_ei@mail.ru; Zoya A. Simonova: <https://orcid.org/0000-0002-2353-1547>, simonovaza@yandex.ru.

Golovko T. K., Dalke I. V., Bacharov D. S. Mesostructure and activity of photosynthetic apparatus for three Crassulacean species grown in cold climate. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, vol. 55, iss. 5, pp. 603–612.

Eskova E. N. Influence of lead on the chlorophyll content in spring barley leaves. In: *Ecology, Environment and Human Health: XXI Century*. Krasnoyarsk, Krasnoyarskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet Publ., 2014, pp. 126–128 (in Russian).

Kositsyna A. A., Makurina O. N., Nesterov V. N., Rozentsvet O. A. Effect of copper and cadmium ions on the pigments of water plants Hydrocharitaceae. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 156–161 (in Russian).

Matorin D. N., Rubin A. B. *Fluorescentsii khlorofilla vysshikh rastenii i vodoroslei* [Fluorescence of Chlorophyll from Higher Plants and Algae]. Izhevsk, Moscow, Izhevskii institut komp'iuternykh issledovaniy Publ., 2012. 256 p. (in Russian).

Rubin A. B. *Biophysics: in 3 vol. Vol. 3. Biophysics of Cellular Processes. Mechanisms of Primary Photobiological Processes*. Moscow, Institut komp'iuternykh issledovaniy Publ., 2013. 480 p. (in Russian).

Tyutereva E. V., Dmitrieva V. A., Voitsekhovskaja O. V. Chlorophyll *b* as a source of signals steering plant development (review). *Agricultural Biology*, 2017, vol. 52, no. 5, pp. 843–855 (in Russian).

Chettri M. K., Cook C. M., Vardaka E., Sawidis T., Lanaras T. The effect of Cu, Zn and Pb on the chlorophyll content of the lichens *Cladonia convoluta* and *Cladonia rangiformis*. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, vol. 39, iss. 1, pp. 1–10.

Dubey R. S. Metal toxicity, oxidative stress and antioxidative defense system in plants. In: S. D. Gupta, ed. *Reactive Oxygen Species and Antioxidants in Higher Plants*. Boca Raton, CRC Press, 2011, pp. 177–203.

Ekpo F. E., Nzegblue E. C., Asuquo M. E. A comparative study of the influence of heavy metals on soil and crops growing within quarry environment at Akamkpa, Cross River State, Nigeria. *Global Journal of Agricultural Sciences*, 2012, vol. 11, no. 1, pp. 1–4.

Filimon R. V., Rotaru L., Filimon R. M. Quantitative investigation of leaf photosynthetic pigments during annual biological cycle of *Vitis vinifera* L. table grape cultivars. *South African Journal Enology and Viticulture*, 2016, vol. 37, no. 1, pp. 1–14.

Kupper H., Kupper F., Spiller M. Environmental relevance of heavy metal substituted chlorophylls using the example of water plants. *Journal of Experimental Botany*, 1996, vol. 47, iss. 2, pp. 259–266.

Lindahl M., Yang D.-H., Anderson B. Regulatory proteolysis of the major light-harvesting chlorophyll *a* / *b* protein complex of photosystem II by a light-induced membrane associated enzymic system. *European Journal of Biochemistry*, 1995, vol. 231, iss. 2, pp. 503–509.

Nagajyoti P. C., Lee K. D., Sreekanth T. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 2010, vol. 8, iss. 3, pp. 199–216.

Patnaik N., Mohanty M., Satpathy B. Effect of chelating agents and metal ions on nickel bioavailability and chlorophyll fluorescence response in wheat – An approach for attenuation of Ni stress. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 2012, vol. 8, iss. 3, pp. 99–112.

Tremper A. H., Agneta M., Burton S., Higgs D. E. B. Field and laboratory exposures of two moss species to low level metal pollution. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2004, vol. 49, iss. 1–3, pp. 111–120.

Voitsekhovskaja O. V., Tyutereva E. V. Chlorophyll *b* in angiosperms: Functions in photosynthesis, signaling and ontogenetic regulation. *Journal of Plant Physiology*, 2015, vol. 189, pp. 51–64.