



## ЭКОЛОГИЯ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 87–98  
*Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology, 2021, vol. 21, iss. 1, pp. 87–98*

Научная статья

УДК 57.044

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-87-98>

### Влияние антропогенного загрязнения среды г. Тюмени на показатели жизнедеятельности травянистых растений

А. С. Петухов<sup>✉</sup>, Т. А. Кремлева, Г. А. Петухова, Н. А. Хритохин

Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6

Петухов Александр Сергеевич, студент Института химии, [revo251@mail.ru](mailto:revo251@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2906-174X>

Кремлева Татьяна Анатольевна, доктор химических наук, директор Института химии, [kreml-ta@yandex.ru](mailto:kreml-ta@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9229-4912>

Петухова Галина Александровна, доктор биологических наук, профессор кафедры экологии и генетики Института биологии, [gpetuhova1@mail.ru](mailto:gpetuhova1@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0580-2283>

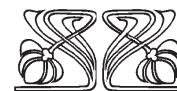
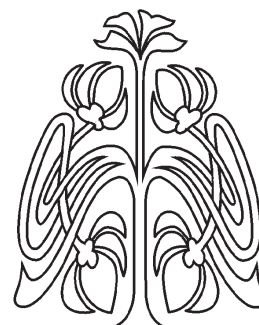
Хритохин Николай Александрович, кандидат химических наук, профессор кафедры неорганической и физической химии Института химии, [kna@utmn.ru](mailto:kna@utmn.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8157-8677>

**Аннотация.** Изучено содержание пигментов фотосинтеза и продуктов перекисного окисления липидов в травянистых растениях г. Тюмени из различных техногенных зон, а также содержание тяжелых металлов в почвах. Отобраны клевер красный (*Trifolium rubens* L.), ромашка аптечная (*Matricaria chamomilla* L.), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.) и мышиный горошек (*Vicia cracca* L.) в районах металлургического, моторостроительного, нефтеперерабатывающего, аккумуляторного заводов, автотрассы, а также в условно чистом районе. Содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mb, Pb, Cd) в почвах городской среды оказалось повышенным по сравнению с фоновым участком, особенно в районе металлургического и аккумуляторного заводов. Изменение содержания пигментов фотосинтеза (относительно контроля) в растениях оказалось видоспецифично, однако при этом наблюдалась тенденция к угнетению фотосинтетического аппарата в условиях городской среды. Содержание продуктов перекисного окисления липидов было повышено в листьях ромашки и мышиного горошка, а в листьях мать-и-мачехи и клевера красного снижено по сравнению с фоновым районом. Содержание тяжелых металлов в почвах положительно коррелировало с уровнем продуктов перекисного окисления липидов в клетках листьев растений. Соотношение содержания продуктов перекисного окисления липидов и пигментов фотосинтеза рекомендуется использовать в качестве показателя устойчивости растений.

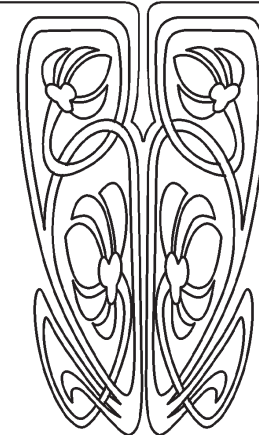
**Ключевые слова:** тяжелые металлы, пигменты фотосинтеза, перекисное окисление липидов, антиоксиданты, растения, городская среда

**Для цитирования:** Петухов А. С., Кремлева Т. А., Петухова Г. А., Хритохин Н. А. Влияние антропогенного загрязнения среды г. Тюмени на показатели жизнедеятельности травянистых растений // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 87–98. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-87-98>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





Article

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-87-98>

### Impact of anthropogenic pollution in Tyumen on herbs vital activity parameters

**Alexander S. Petukhov** ✉, [revo251@mail.ru](mailto:revo251@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2906-174X>

**Tatyana A. Kremleva**, [krem1-ta@yandex.ru](mailto:krem1-ta@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9229-4912>

**Galina A. Petukhova**, [gpetuhova1@mail.ru](mailto:gpetuhova1@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0580-2283>

**Nikolay A. Khritokhin**, [kna@utmn.ru](mailto:kna@utmn.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8157-8677>

University of Tyumen, 6 Volodarskogo St., Tyumen 625003, Russia

**Abstract.** The purpose of this study was the investigation of lipid peroxidation products and photosynthetic pigment content in cells of herbs of various species in conditions of anthropogenic pollution of Tyumen. The material for the research was collected near different plants of Tyumen: metallurgical, engine, oil refinery, battery manufacturing as well as highway pollution. The following species of plants were analysed: coltsfoot (*Tussilago farfara*), red clover (*Trifolium rubens*), chamomile (*Matricaria chamomilla*) and wild vetch (*Vicia cracca*). Heavy metal concentration in soils of urban areas turned out to be elevated compared to background sites. Especially high heavy metal content was registered near metallurgical and battery manufacturing plants. Changes in photosynthetic pigment concentration turned out to be species-specific. An increase in photosynthetic pigments was obtained in chamomile cells, while in other plants oppression of photosynthetic apparatus was revealed. Concentration of lipid peroxidation cells of chamomile, meadow grass and wild vetch was increased compared to background site, while in coltsfoot and red clover it decreased. Heavy metal content in soils positively correlated with lipid peroxidation in plants. Oxidation stress in chamomile cells created energetic starvation, which was reflected in a positive correlation between photosynthetic pigments and the concentration of conjugated dienes in cells.

**Keywords:** heavy metals, photosynthetic pigments, lipid peroxidation, antioxidants, plants, urban environment

**For citation:** Petukhov A. S., Kremleva T. A., Petukhova G. A., Khritokhin N. A. Impact of anthropogenic pollution in Tyumen on herbs vital activity parameters. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology*, 2021, vol. 21, iss. 1, pp. 87–98. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-87-98>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

### Введение

Тяжелые металлы (ТМ) занимают особое место в списке загрязнителей окружающей среды из-за высокой распространённости, токсичности и наличия кумулятивного эффекта [1]. Попадая в атмосферу, воду и почву, тяжелые металлы способны мигрировать в растения и аккумулироваться. Аккумуляция ТМ растениями создает экологическую опасность в дальнейшей передаче по пищевым цепочкам [2].

Накопление ТМ растениями приводит к ряду нарушений в жизнедеятельности, одним из которых является процесс перекисного окисления липидов (ПОЛ) [3]. ПОЛ протекает по радикальному цепному механизму, инициаторами реакции являются активные формы кислорода (АФК) [4]. ТМ оказывают ингибирующее действие на скорость электронного транспорта на мембранах хлоропластов и митохондрий, вызывают изменения в структуре антиоксидантных ферментов в результате связывания токсичных ионов с сульфгидрильными группами белков, а также заменяют в молекуле необходимые ионы металлов, что приводит к снижению их активности [4]. Кроме того, сообщалось [5], что тяжелые металлы способны активировать липоксигеназу. Все это способствует увеличению содержания АФК в клетке растений и развитию окислительного

стресса. Металлы переменной валентности могут катализировать процесс перекисного окисления липидов, участвуя в образовании свободных радикалов путем отдачи электрона. Также они могут принимать участие в цикле Габера–Вейса и генерировать АФК [5].

Развитие окислительных процессов в клетках приводит к неспособности синтезировать молекулы АТФ, энергетическому голоду и нарушению структуры мембран [6]. В связи с этим растениям необходимы антиоксиданты. К числу растительных антиоксидантов относятся каротиноиды. Каротиноиды способны защищать от окислительного повреждения пигменты и ненасыщенные жирные кислоты, входящие в состав липидов, за счет связывания АФК, в первую очередь синглетной формы кислорода [7].

Кроме того, каротиноиды также участвуют в процессе фотосинтеза, собирая свет и передавая электроны на хлорофилл [7]. Фотосинтетический аппарат растений весьма чувствителен к повышенному содержанию тяжелых металлов в окружающей среде, что проявляется в изменении многих структурно-функциональных параметров фотосинтеза [8]. Процесс фотосинтеза обеспечивает клетки растений энергией, необходимой для синтеза антиоксидантов в условиях стресса. Однако с другой стороны, при



накоплении ТМ может наблюдаться нарушение структуры фотосинтетических пигментов, белков и ферментов. В связи с этим актуальной задачей является выявление взаимосвязи между содержанием продуктов ПОЛ и пигментов фотосинтеза в клетках растений в условиях загрязнения среды тяжелыми металлами.

Целью данного исследования стало изучение содержания продуктов перекисного окисления липидов и пигментов фотосинтеза в листьях травянистых растений в условиях антропогенного загрязнения г. Тюмени.

### Материалы и методы

Материал для исследования отобран в конце июля 2018 г. в течение 3–4 дней в различных районах г. Тюмени на следующих участках:

- 1) контроль – луг на удалении 5 км от антропогенных источников;
- 2) автотрасса Тюмень – Омск – район п. Винзили, 30 км от г. Тюмени, интенсивность движения 700 машин в час (в середине дня), удаление от автотрассы не более 30 м;
- 3) моторостроители – г. Тюмень, участок на удалении 200 м от предприятия «Тюменские Моторостроители»;
- 4) НПЗ – г. Тюмень, участок на удалении 200 м от предприятия Антипинского нефтеперерабатывающего завода;
- 5) УГМК (Уральская горно-металлургическая компания) – г. Тюмень, участок на удалении 200 м к югу от предприятия «УГМК-Сталь» вблизи автотрассы;
- 6) УГМК 2 – г. Тюмень, участок на удалении 50 м от предприятия «УГМК-Сталь»;
- 7) УГМК 3 – г. Тюмень, участок на удалении 2000 м к востоку от предприятия «УГМК-Сталь» вблизи автотрассы;
- 8) УГМК 4 – г. Тюмень, участок на удалении 500 м к северу от предприятия «УГМК-Сталь»;
- 9) район аккумуляторного завода, г. Тюмень, участок на удалении 200 м от предприятия.

Площадь участков составляла не менее 100 м<sup>2</sup>. На каждом участке были выделены 5 опытных площадок, с каждой из которых была срезана надземная часть 30 растений. На участках 1–3, 5–7 отобраны 4 вида растений: клевер красный (*Trifolium rubens* L.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), ромашка аптечная (*Matricaria chamomilla* L.), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.). На участке 4 и 9 ромашка аптечная не обнаружена. Выбор растений обусловлен широким распространением данных видов в районах исследования. Усредненную пробу отбирали методом квартования. Исследование содержания

хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в клетках листьев растений проведено спектральным анализом спиртовых экстрактов при длине волны 662, 644 и 440 нм соответственно [9]. Анализ диеновых конъюгатов и оснований Шиффа проводился в гептановых экстрактах, полученных из тканей листа растений на длине волны 233 и 365 нм соответственно [10].

Пробы почвы отбирали методом конверта на глубину 0–10 см. После этого воздушно-сухую массу почвы усредняли по методу квартования, перетирали и просеивали через сито. Анализ содержания металлов проводили с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра «ContrAA 700» (AnalyticJena, Германия) с использованием ацетатно-аммонийного буфера с pH=4,8 (определение подвижных форм металлов) и экстрактов 1М HNO<sub>3</sub> (определение кислоторастворимых форм) в лаборатории экологических исследований Тюменского государственного университета по РД 52.18.289-90 и РД 52.18.191-89 соответственно. Все измерения проводились в трех повторностях. Полученные результаты подвергнуты стандартной статистической обработке с использованием программного обеспечения Statistica 10. Рассчитывали среднее значение, стандартную ошибку, сравнение выборок проводили по *t*-критерию с уровнем доверительной вероятности  $P \leq 0,05$ .

### Результаты и их обсуждение

В изученных пробах почв г. Тюмени выявлено загрязнение Fe практически на всех исследованных участках, по сравнению с контролем (таблица). Содержание Pb в почве в районе аккумуляторного завода превышало ПДК более чем в 5 раз. Кроме того, выявлено превышение фоновых значений по содержанию Cu, Mn и Zn на всех изученных участках. Было обнаружено, что содержание Zn в почве на участке УГМК 4 превышало ПДК в 1,4 раза. Содержание Cd во всех исследованных пробах почвы находилось на уровне предела определения (<1 мг/кг). Доля подвижных форм тяжелых металлов в почве убывала в следующем ряду: Mn>Zn>Cu>Fe. Наиболее высокие концентрации всех исследованных тяжелых металлов в почве наблюдались в районе аккумуляторного и металлургического заводов.

Изменение содержания пигментов фотосинтеза в листьях растений оказалось видоспецифичным. На большинстве исследованных участков содержание пигментов фотосинтеза в листьях ромашки превышало контроль на 5–20%, наибольшее увеличение содержания пигментов наблюдалось в районе автотрассы (рис. 1). По



Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в почвах г. Тюмени в 2018 г.  
(над чертой – подвижные формы, под чертой – кислоторастворимые формы)  
The content of heavy metals (mg / kg) in the soils of Tyumen in 2018  
(above the line – mobile forms, below the line-acid-soluble forms)

Участок / Plot	Cd, мг/кг Cd, mg kg <sup>-1</sup>	Cu, мг/кг Cu, mg kg <sup>-1</sup>	Fe, мг/кг Fe, mg kg <sup>-1</sup>	Mn, мг/кг Mn, mg kg <sup>-1</sup>	Pb, мг/кг Pb, mg kg <sup>-1</sup>	Zn, мг/кг Zn, mg kg <sup>-1</sup>
Контроль / Control	0,53±0,16 0,44±0,10	0,07±0,01 1,78±0,27	47,70±2,64 24500±138	37,80±6,03 176±11	16,50±3,23 10,40±5,18	2,30±0,06 12,80±5,01
Автотрасса / Highway	0,48±0,21 0,35±0,10	0,44±0,07 3,66±0,42	58,70±7,10 22000±1960	60,10±2,51 318±19	14,10±3,54 10,50±5,23	0,94±0,01 12,00±1,51
Моторостроительный завод / Engine-building plant	0,48±0,20 0,53±0,10	0,44±0,07 9,67±0,60	32,80±0,66 41600±4750	94,00±9,10 461±13	19,00±5,20 18,30±2,30	2,89±0,13 23,30±3,38
НПЗ / Oil refinery	0,54±0,20 0,46±0,10	0,32±0,05 7,05±0,32	25,00±13,70 44400±5770	25,20±1,01 265±29	27,20±1,36 28,50±3,26	0,73±0,05 14,20±0,31
Аккумуляторный завод / Battery-manufacturing plant	0,62±0,12 0,52±0,13	0,45±0,07 15,80±1,00	22,70±7,92 87900±2200	58,00±5,40 488±35	49,00±3,94 172±6	2,85±0,01 55,50±2,63
УГМК / UMMC	0,46±0,18 0,33±0,10	0,07±0,01 8,49±0,75	16,30±2,25 58500±6480	69,50±4,51 453±88	17,30±0,82 17,90±2,28	2,55±0,08 28,30±3,88
УГМК 2 / UMMC 2	0,55±0,22 0,46±0,10	0,02±0,01 10,20±0,71	30,20±4,16 64700±4770	124±9 440±82	20,40±5,90 18,20±3,44	5,94±0,03 52,80±2,50
УГМК 3 / UMMC 3	0,57±0,21 0,53±0,10	0,18±0,03 11,10±1,00	60,00±6,51 73500±5220	106±2 504±33	19,30±2,25 17,40±1,04	6,41±0,89 53,70±8,57
УГМК 4 / UMMC 4	0,84±0,30 0,70±0,12	0,28±0,05 28,10±1,96	60,90±8,23 78000±5310	93,20±8,29 579±67	19,70±1,40 21,20±0,94	11,90±0,19 142±29

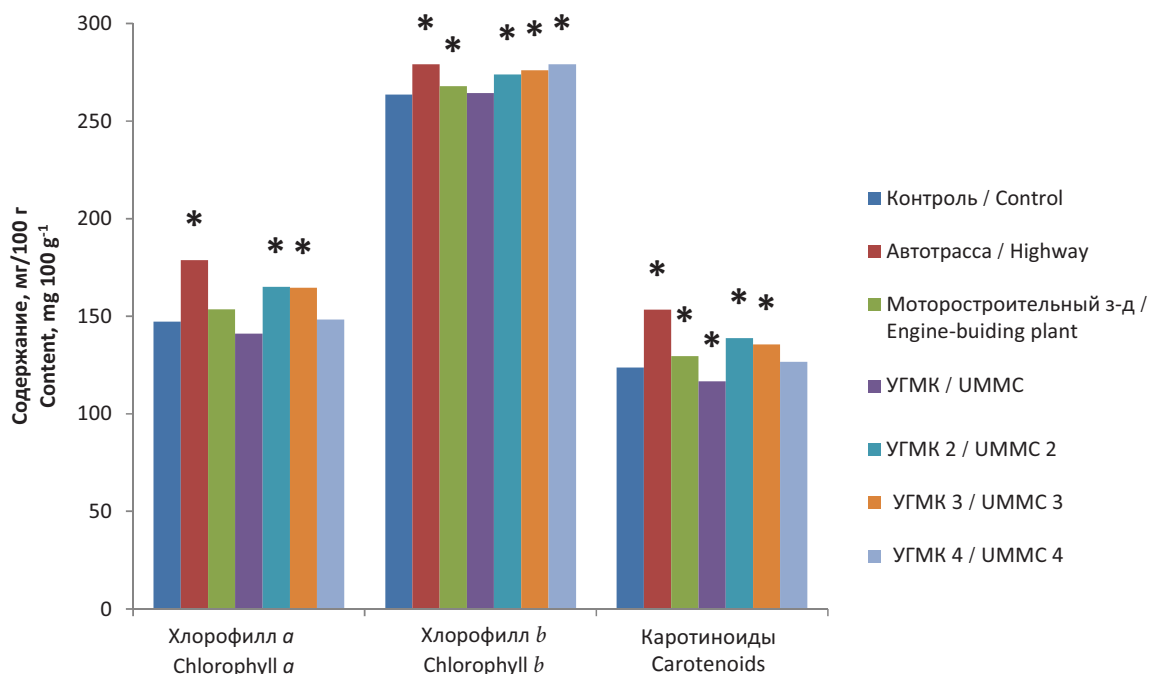


Рис. 1. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях ромашки аптечной, произрастающей в районах антропогенного загрязнения. Условные обозначения: \* – статистически значимые ( $P \leq 0,05$ ) различия между контролем и вариантом опыта (цвет online)

Fig. 1. Photosynthetic pigments content in leaves of chamomile, grown in area of anthropogenic pollution. Symbols: \* – statistically significant differences between control and test group ( $P \leq 0,05$ ) (color online)



всей видимости, в листьях ромашки в связи со стрессом, вызванным условиями городской среды, появилась необходимость синтезировать больше органических веществ для детоксикации поступающих загрязнителей, что нашло отражение в росте содержания пигментов. Содержание каротиноидов, выполняющих антиоксидантную функцию в клетках, возможно, увеличивается для предотвращения развития процессов ПОЛ. Известно, что в небольших дозах токсиканты способны стимулировать фотосинтез и жизнедеятельность растений [11, 12], что может объяснить полученные результаты. Увеличение содержания пигментов фотосинтеза в растениях при загрязнении среды кадмием было ранее выявлено для чины приморской [13].

Была обнаружена тенденция к снижению содержания пигментов фотосинтеза в листьях мышиного горошка. Концентрация хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов вблизи автотрассы, нефтеперерабатывающего, аккумуляторного и металлургического заводов (на участках УГМК, УГМК 2 и УГМК 3) снижалась на 7–20%. Однако в районе моторостроительного завода наблюдалось увеличение содержания пигментов на 7–14%, а на участке УГМК 4 концентрация пигментов не отличалась от контроля, за исключением повышения уровня хлорофилла *b* на 3% (рис. 2). Содержание пигментов фотосинтеза в листьях мышиного горошка, клевера красного и мать-и-мачехи было также снижено в условиях городской среды по сравнению с фоновым участком и в эксперименте 2017 г. [14].

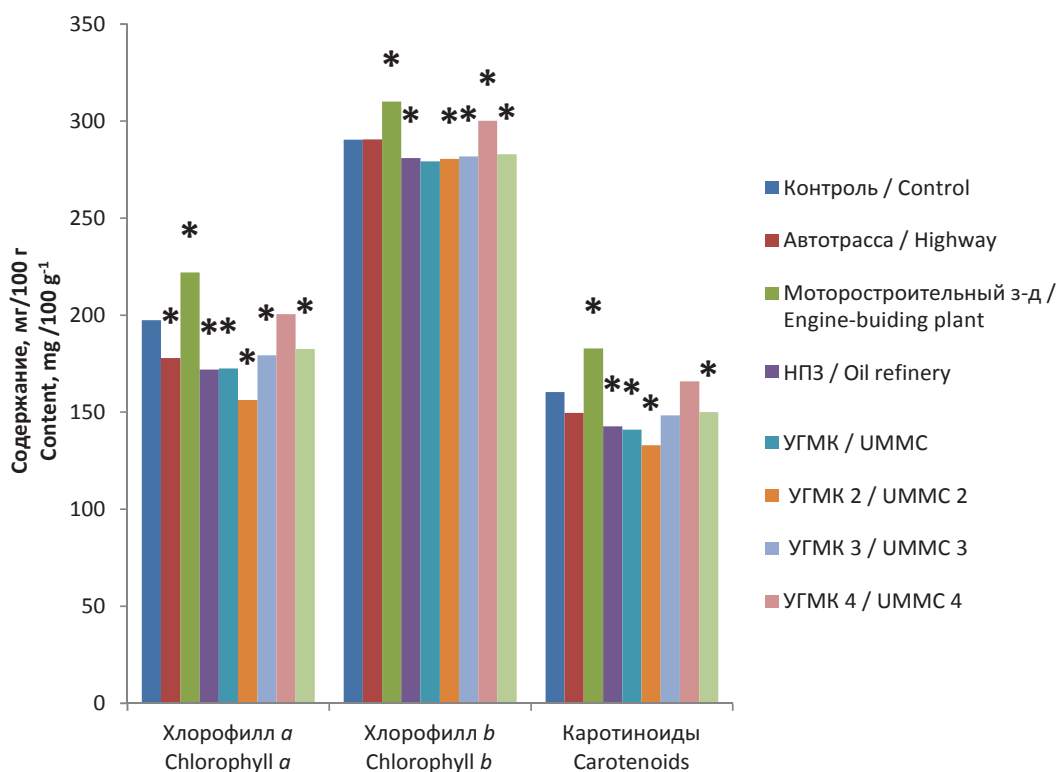


Рис. 2. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях горошка мышиного, произрастающего в районах антропогенного загрязнения. Условные обозначения см. рис. 1 (цвет online)  
 Fig. 2. Photosynthetic pigments content in leaves of wild vetch, grown in area of anthropogenic pollution. Symbols are the same as in Fig. 1 (color online)

Аналогичная ответная реакция была обнаружена в листьях клевера красного и мать-и-мачехи: концентрация пигментов фотосинтеза была снижена на 5–20% (рис. 3, 4).

Из тенденции к снижению содержания пигментов фотосинтеза в листьях клевера красного и мать-и-мачехи наблюдались исключения. Концентрация пигментов была повышена вблизи автотрассы как в листьях клевера красного, так

и в листьях мать-и-мачехи на 7–14%. В листьях мать-и-мачехи из района аккумуляторного завода наблюдалось небольшое повышение содержания пигментов фотосинтеза относительно контроля. Содержание пигментов в листьях клевера красного на участке УГМК 2 оставалось на уровне контроля.

Главной причиной снижения содержания пигментов фотосинтеза в присутствии тяжелых

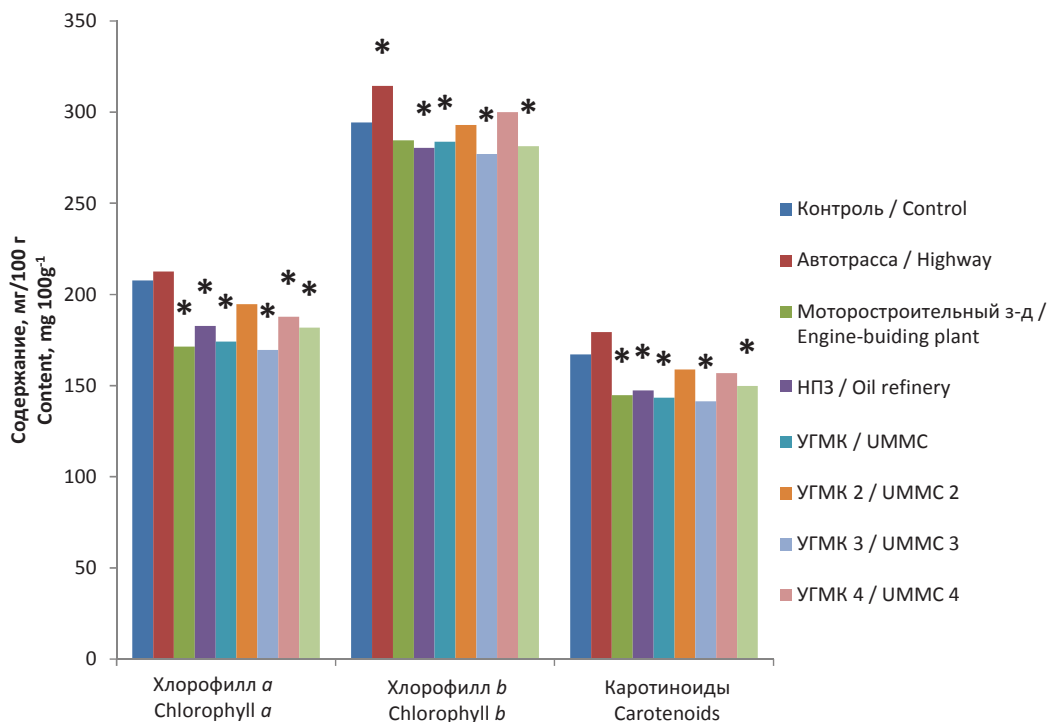


Рис. 3. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях клевера красного, произрастающего в районах антропогенного загрязнения. Условные обозначения см. рис. 1 (цвет online)

Fig. 3. Photosynthetic pigments content in leaves of wild vetch, grown in area of anthropogenic pollution. Symbols are the same as in Fig. 1 (color online)

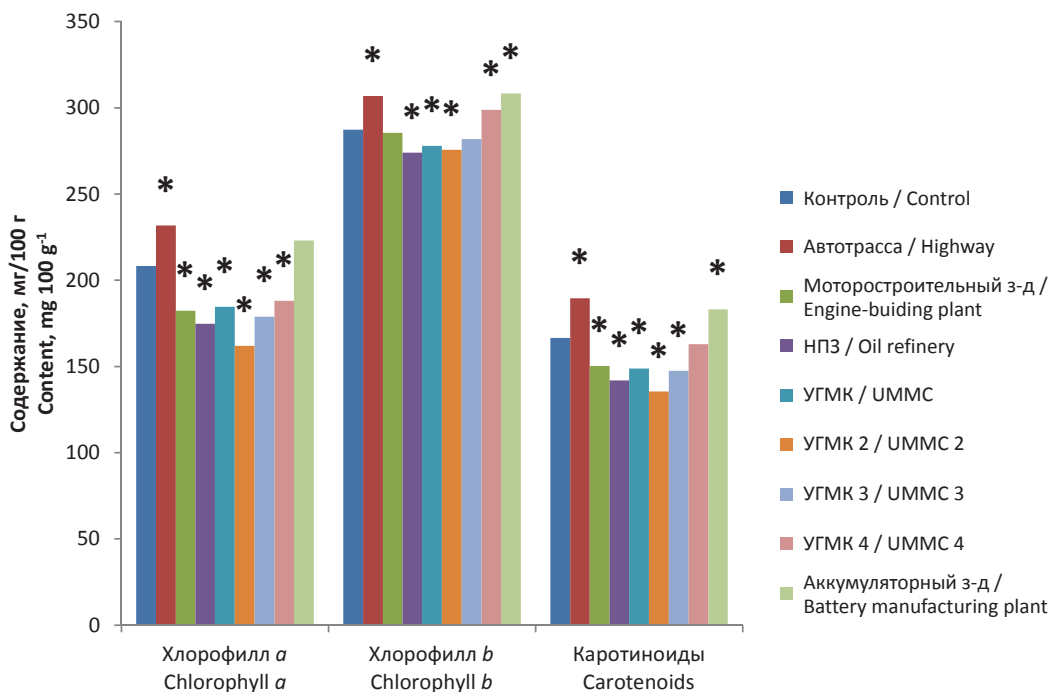


Рис. 4. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях мать-и-мачехи обыкновенной, произрастающей в районах антропогенного загрязнения. Условные обозначения см. рис. 1 (цвет online)

Fig. 4. Photosynthetic pigments content in leaves of coltsfoot, grown in area of anthropogenic pollution. Symbols are the same as in Fig. 1 (color online)



металлов является подавление их синтеза, связанное в первую очередь с непосредственным действием металлов на активность ферментов биосинтеза. Кроме того, нарушение синтеза хлорофилла в присутствии тяжелых металлов может быть вызвано вытеснением ими ионов  $Mg^{2+}$  из молекулы пигмента. Некоторые металлы, например  $Cu$ , в больших концентрациях замедляют связывание молекул хлорофиллов с белками в светособирающих комплексах фотосистем. Известно, что тяжелые металлы способны изменять функционирование мембран хлоропластов и ингибировать работу белков фотосистемы II [8]. Вызываемые тяжелыми металлами окислительные процессы в клетках увеличивают концентрации свободных радикалов, для связывания которых растениям приходится расходовать различные антиоксиданты, в том числе и каротиноиды. Снижение содержания пигментов фотосинтеза при действии ТМ ранее было выявлено в ряде работ [15–17].

Уменьшение отношения содержания хлорофиллов  $a/b$  считается показателем стресса растения [11]. В 2018 г. в листьях мышиного горошка, клевера красного и листьях мать-и-мачехи наблюдалось снижение отношения хлорофилла  $a/b$  до 19% вблизи моторостроительного, нефтеперерабатывающего, металлургического и аккумуляторного заводов. Показательно, что в листьях этих же растений наблюдалось снижение содержания пигментов фотосинтеза. Интересно, что аналогичный результат был получен и в 2017 г.: отношение хлорофилл  $a/b$  снижалось в листьях мать-и-мачехи до 30%, в клевере красном – до 18% и мышином горошке – до 12% [14]. Снижение отношения хлорофилла  $a/b$  на 5–30% было

также ранее зарегистрировано в листьях ярового ячменя при загрязнении почвы свинцом [18]. Наибольшее влияние на отношение хлорофилла  $a/b$  оказало загрязнение, вызванное близостью металлургического завода, в то время как близость к автотрассе не оказывала эффекта на изучаемое соотношение пигментов фотосинтеза. Отношение содержания хлорофилла  $a/b$  в большинстве случаев не отличалось от контроля в листьях ромашки, что также коррелирует с отсутствием снижения содержания пигментов.

Продукты перекисного окисления липидов являются индикатором биохимического повреждения клеток и стрессуемости организма. В проведенном эксперименте 2018 г. было выявлено, что наиболее сильному повреждению в условиях городской среды подвергаются клетки листьев ромашки: содержание оснований Шиффа было повышено в 2,2–3,8 раза по сравнению с контролем, а уровень диеновых конъюгатов превышает контрольные значения в 2 (вблизи автотрассы) – 7 раз (в районе моторостроительного завода) на всех исследованных участках (рис. 5). Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности процессов перекисного окисления, протекающих в клетках листьев ромашки к антропогенному загрязнению. Ранее аналогичные результаты были получены и в эксперименте 2017 г. [14].

Характер изменения содержания продуктов ПОЛ в клетках листьев мышиного горошка оказался неоднозначным (рис. 6).

Наблюдалось как увеличение содержания диеновых конъюгатов и оснований Шиффа, так и снижение их количества, по сравнению с контролем. Например, концентрация оснований

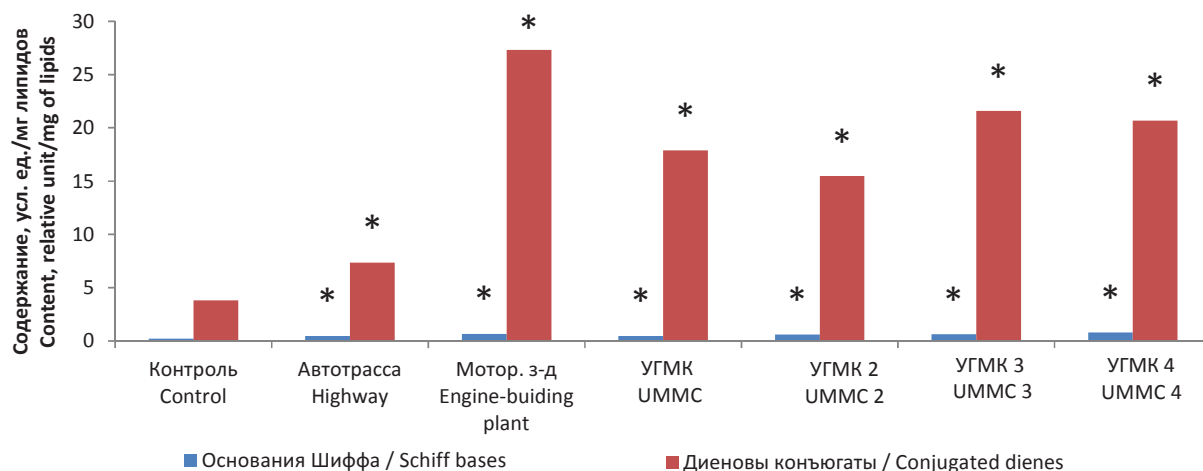


Рис. 5. Содержание продуктов перекисного окисления липидов в клетках листьев ромашки аптечной, произрастающей в районах антропогенного загрязнения. Условные обозначения см. рис. 1 (цвет online)  
 Fig. 5. Lipid peroxidation products concentration in leaves of chamomile, grown in area of anthropogenic pollution. Symbols are the same as in Fig. 1 (color online)

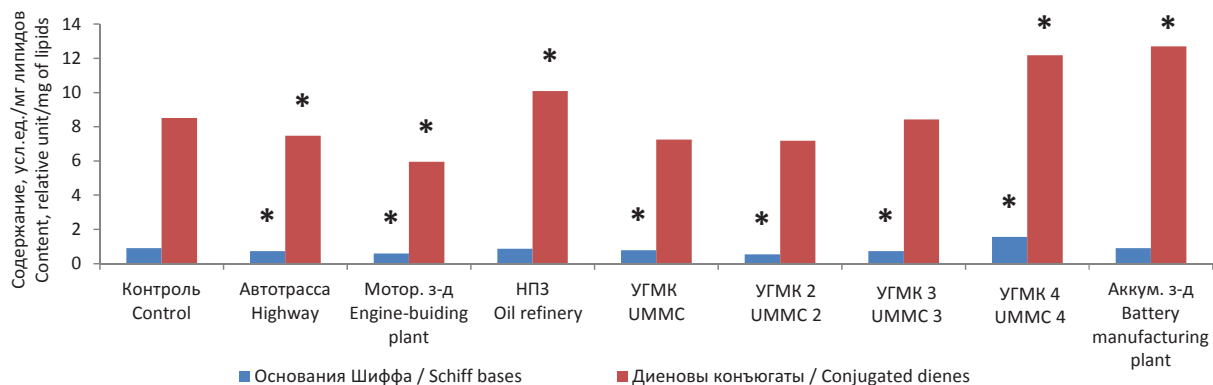


Рис. 6. Содержание продуктов перекисного окисления липидов в клетках листьев горошка мышиного, произрастающего в районах антропогенного загрязнения. Условные обозначения см. рис. 1 (цвет online)  
Fig. 6. Lipid peroxidation products concentration in leaves of wild vetch, grown in area of anthropogenic pollution. Symbols are the same as in Fig. 1 (color online)

Шиффа на участках УГМК, УГМК 2 и УГМК 3 была снижена на 15–40%, а на участке УГМК 4 оказалась выше, чем в контроле на 70%. Содержание продуктов ПОЛ вблизи моторостроительного завода и автотрассы было снижено на 10–35%, а в районе НПЗ и аккумуляторного завода повышено на 20–50%.

Увеличение содержания продуктов ПОЛ в клетках листьев ромашки, мышиного горошка может быть связано с аккумуляцией в них тяжелых металлов, которые способны генерировать АФК по реакциям Фентона и Габера–Вейсаи активировать фермент липоксигеназу [5]. Также ТМ могут связываться с сульфгидрильными, гидроксильными, карбоксильными группами белков и ингибировать функционирование антиоксидантных ферментов. Кроме того, известно, что нефтяное загрязнение, характерное для нефтеперерабатывающего завода, способно активировать процесс перекисного окисления путем ингибирования транспорта электронов в хлоропластах [19]. Развитие процессов пере-

кисного окисления липидов в клетках растений различных видов при действии тяжелых металлов было ранее выявлено и в других исследованиях [17, 20–23].

Влияние ТМ на развитие процессов ПОЛ частично подтверждается наблюдаемыми корреляционными зависимостями. Так, содержание оснований Шиффа в клетках листьев мышиного горошка положительно коррелировало с содержанием Cu и Zn в почвах ( $r = 0,73, 0,76$  соответственно), диеновых конъюгатов – с содержанием Cu, Fe и Zn ( $r = 0,65, 0,58, 0,59$ ). Аналогичные корреляции наблюдались и по содержанию оснований Шиффа в клетках листьев ромашки с уровнем Cu, Zn, Fe и Mn в почвах.

Другая картина наблюдалась при анализе содержания продуктов ПОЛ в клетках листьев клевера красного и мать-и-мачехи. Содержание оснований Шиффа и диеновых конъюгатов в большинстве изученных проб клевера красного было на 17–45% ниже, чем в контроле (рис. 7).

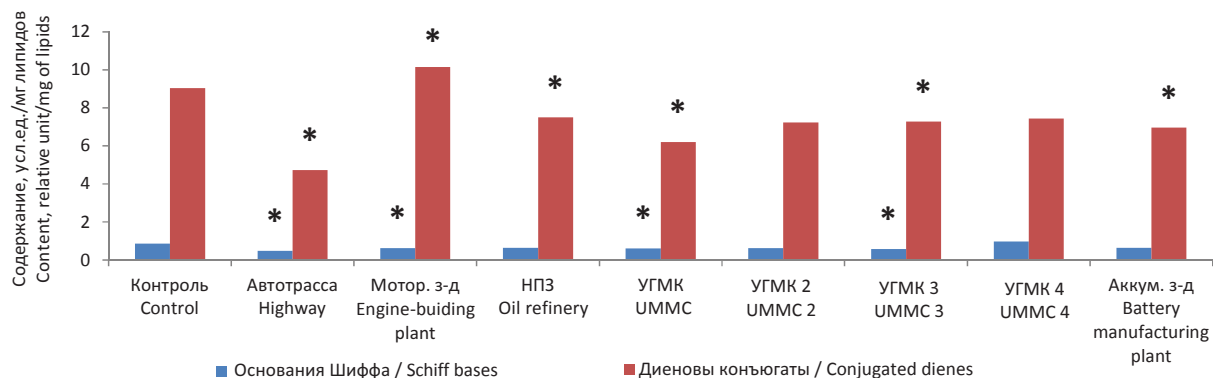


Рис. 7. Содержание продуктов перекисного окисления липидов в клетках листьев клевера красного, произрастающего в районах антропогенного загрязнения. Условные обозначения см. рис. 1 (цвет online)  
Fig. 7. Lipid peroxidation products concentration in leaves of red clover, grown in area of anthropogenic pollution. Symbols are the same as in Fig. 1 (color online)





В 2018 г. содержание продуктов ПОЛ в мать-и-мачехе в большинстве случаев также было снижено: до 55 и 40% по содержанию оснований Шиффа и диеновых конъюгатов соответственно (рис. 8). Однако на участке УГМК 4 содержание продуктов ПОЛ было повышено на 20–25%. Аналогичный результат был получен и для мышиного горошка. Вероятно, это обусловлено высоким содержанием Zn в почве на участке

УГМК 4. Вблизи моторостроительного завода уровень диеновых конъюгатов также оказался на 20% выше, чем в контроле, хотя содержание оснований Шиффа было снижено на 40%, что может быть обусловлено протекающим процессом адаптации растений. Ранее тенденция к снижению содержания продуктов ПОЛ в клетках листьев мать-и-мачехи и клевера красного была зарегистрирована в 2017 г. [14].

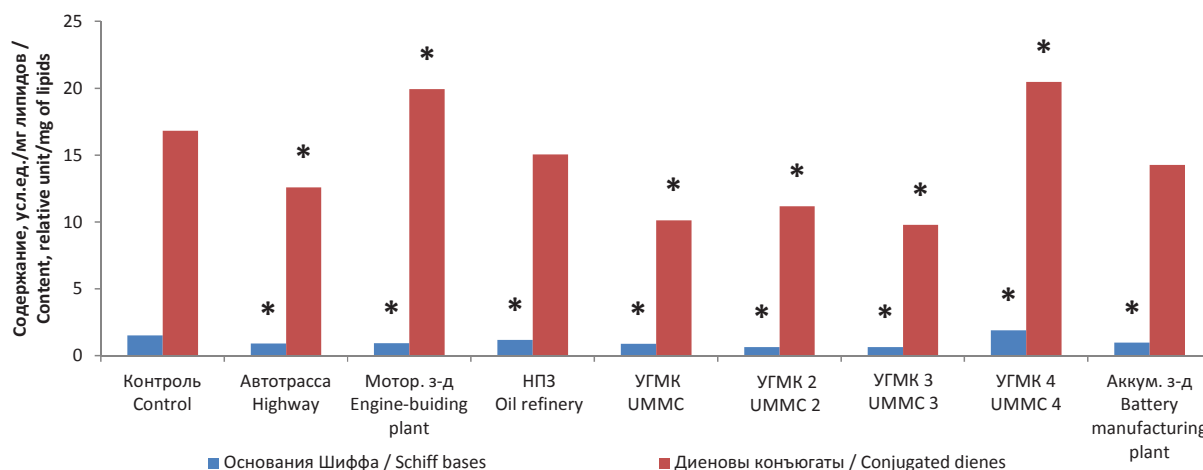


Рис. 8. Содержание продуктов перекисного окисления липидов в клетках листьев мать-и-мачехи обыкновенной, произрастающей в районах антропогенного загрязнения. Условные обозначения см. рис. 1 (цвет online)

Fig. 8. Lipid peroxidation products concentration in leaves of coltsfoot, grown in area of anthropogenic pollution. Symbols are the same as in Fig. 1 (color online)

Полученный результат можно объяснить несколькими причинами. Возможно, в условиях стресса антиоксидантные системы клевера красного и мать-и-мачехи успешно активизируются и ликвидируют избыток активных форм кислорода. Растения, произрастающие в районах антропогенного загрязнения, могли выработать механизмы блокирования поступления токсинов путем их хелатирования в клетках корня или компартментализации в цитоплазме. Кроме того, в изученных участках возможен отбор на генетическом уровне растений, наиболее приспособленных к данным условиям. Снижение содержания продуктов ПОЛ было обнаружено при загрязнении почвы Pb и Cd в определенных дозах [24, 25].

Несмотря на то что содержание продуктов ПОЛ в клетках листьев клевера красного и мать-и-мачехи было снижено, выявлены положительные корреляции между содержанием оснований Шиффа в клетках листьев клевера красного и уровнем Cu, Mn и Zn в почвах ( $r = 0,59, 0,69, 0,62$  соответственно), а также между содержанием оснований Шиффа в клетках листьев мать-и-мачехи и содержанием Zn и Mn в почвах ( $r = 0,48, 0,47$ ).

Для снижения содержания продуктов ПОЛ растениям необходима работа антиоксидантных систем, обеспечиваемая энергией от процесса фотосинтеза. В листьях ромашки содержание пигментов фотосинтеза было повышено, однако было повышено и содержание продуктов ПОЛ. Вероятно, это свидетельствует о все еще протекающей адаптации растений к условиям антропогенной среды. С другой стороны, содержание продуктов ПОЛ в клетках листьев мышиного горошка, клевера красного и мать-и-мачехи было снижено, что говорит об отсутствии необходимости поддерживать высокий энергетический статус, и, как следствие, содержание пигментов фотосинтеза в листьях оказалось снижено. Данную реакцию растений можно рассматривать как успешную адаптацию в условиях городской среды.

Содержание диеновых конъюгатов в клетках листьев ромашки положительно коррелировало с концентрацией хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов ( $r = 0,56, 0,77, 0,55$ ). Это может служить частичным подтверждением вышеописанной гипотезы о высокой потребности листьев ромашки в энергии и увеличении содержания пигментов фотосинтеза в ответ на стресс и рост содержания продуктов ПОЛ.



## Выводы

1. Содержание ТМ в почвах их техногенных зон г. Тюмени оказалось повышенным по сравнению с фоновой точкой. Максимальные концентрации ТМ были обнаружены в районе металлургического и аккумуляторного заводов, при этом были выявлены превышения ПДК по содержанию Zn и Pb.

2. Ответная реакция фотосинтетического аппарата растений на антропогенное загрязнение городской среды оказалась видоспецифичной: была зарегистрирована тенденция к снижению содержания пигментов в листьях мать-и-мачехи обыкновенной, клевера красного и мышиного горошка, в то время как содержание пигментов в листьях ромашки аптечной превышало контрольные значения.

3. Выявлено увеличение содержания продуктов ПОЛ в клетках листьев ромашки аптечной и мышиного горошка из районов с техногенной нагрузкой по сравнению с фоновым районом. Вероятно, антиоксидантные системы клевера красного и мать-и-мачехи обыкновенной успешно адаптировались к промышленному загрязнению, что нашло отражение в снижении содержания продуктов ПОЛ в клетках листьев. Для всех изученных видов растений были обнаружены положительные корреляции между содержанием ТМ в почвах и концентрацией продуктов ПОЛ.

4. Анализ соотношения содержания продуктов ПОЛ и пигментов фотосинтеза в листьях растений выявил устойчивость мышиного горошка, клевера красного и мать-и-мачехи обыкновенной к условиям городской среды и протекающие процессы адаптации в листьях ромашки аптечной.

## Список литературы

1. Rai P. K., Lee S. S., Zhang M., Tsang Y. F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management // *Environment International*. 2019. № 125. P. 365–385.
2. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. 4<sup>th</sup> ed. Boca Raton : CRC Press, 2011. 534 p.
3. Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdorani F. Review article heavy metals and some mechanisms of plant defense response // *The Scientific World Journal*. 2015. № 4. P. 1–18.
4. Скугорева С. Г., Ашихмина Т. Я., Фокина А. И., Лялина Е. И. Химические основы токсического действия тяжелых металлов (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2016. № 1. С. 1–10.
5. Shahid M., Pourrut B., Dumat C., Nadeem M., Aslam M., Pinelli E. Heavy-metal-induced reactive oxygen species: phytotoxicity and physicochemical changes in plants // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2014. № 232. P. 1–44.
6. Anjum N. A., Sofo A., Scopa A. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. № 22. P. 4099–4121.
7. Arif N., Yadav V., Singh S., Kushwaha B. K., Singh S., Tripathi D. K. Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals // *Plants Responses to Xenobiotics*. Singapore : Springer, 2016. P. 97–125.
8. Aggarwal A., Sharma I., Tripathi B.N., Munjal A. J., Baunthiyal M., Sharma V. Metal toxicity and photosynthesis // *Photosynthesis : Overviews on Recent Progress & Future Perspective*. New Delhi : International Publishing House, 2011. P. 229–236.
9. Шульгин И. А., Ничипорович А. А. Расчет содержания пигментов с помощью номограмм // *Хлорофилл* / под ред. А. А. Шлыка. Минск : Наука и техника, 1974. С. 127–136.
10. Шведова А. А., Полянский Н. Б. Метод определения конечных продуктов перекисного окисления липидов в тканях – флуоресцирующих шиффовых оснований // *Исследование синтетических и природных антиоксидантов in vitro и in vivo* : сб. науч. ст. М. : Наука, 1992. С. 72–73.
11. Кушнарёва О. П., Перекрестова Е. Н. Влияние различных концентраций солей меди и свинца на содержание хлорофилла и содержание углерода в листьях растений // *Вестн. Оренбург. гос. ун-та*. 2015. № 10. С. 294–297.
12. Baek S., Han T., Ahn S., Kang H., Cho M.R., Lee S. Effects of heavy metals on plants growth and pigment content in *Arabidopsis thaliana* // *Plants Pathology Journal*. 2012. № 28, iss. 4. P. 446–452.
13. Масленников П. В. Реакция антиоксидантной системы чины приморской на действие ионов кадмия // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2013. № 11. С. 67–70.
14. Петухов А. С., Христов Н. А., Петухова Г. А. Оценка содержания пигментов фотосинтеза у растений разных видов в условиях антропогенного стресса // *Международный студенческий научный вестник*. 2017. № 6. URL: <https://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=17987>
15. Benzarti S., Mohri S., Ono S. Plant response to heavy metal toxicity: comparative study between hyperaccumulator *Thaspicaerulescens* (Ecotype Ganges) and nonaccumulator plants: lettuce, radish, and alfalfa // *Environmental Toxicology*. 2008. № 5. P. 607–616.
16. Казнина Н. М., Титов А. Ф., Лайдинен Г. Ф., Батова Ю. В. Влияние кадмия на некоторые физиологические показатели растения ячменя в зависимости от возраста // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2010. № 2. С. 27–31.
17. Lei Y., Korpelainen H., Li C. Physiological and biochemical responses to high Mn concentrations in two contrasting *Populus cathayana* populations // *Chemosphere*. 2007. № 68. P. 686–694.



18. Еськова Е. Н. Влияние свинца на содержание хлорофилла в листьях ярового ячменя // Проблемы современной аграрной науки : материалы науч. конф. 15 окт. 2015 г., Красноярск. Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2015. С. 21–22.
19. Осипова Е. С. Влияние нефтяного загрязнения на биохимические и морфофизиологические показатели растений : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тюмень, 2013. 24 с.
20. Dazy M., Masfaraud J., Ferard J. Induction of oxidative stress biomarkers associated with heavy metals stress in *Fontinalis antipyretica* Hedw. // *Chemosphere*. 2009. № 75. P. 297–302.
21. Pirsellova B., Kuna R., Libantova J., Moravcikova J., Matusikova I. Biochemical and physiological comparison of heavy metal-triggered defense responses in the monocot maize and dicot soybean roots // *Molecular Biology Reports*. 2011. № 38. P. 3437–3446.
22. Juknys R., Vitkauskaitė G., Racaite M., Vencloviene J. The impacts of heavy metals on oxidative stress and growth of spring barley // *Central European Journal of Biology*. 2012. № 7, iss. 2. P. 299–306.
23. Hassanein R. A., Hashem H. A., El-Deep M. H., Shouman A. Soil contamination with heavy metals and its effect on growth, yield and physiological responses of vegetable crop plants (turnip and lettuce) // *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*. 2013. № 4. P. 145–162.
24. Aydin S., Buyuk D., Gunduzer E., Buyuk P., Kandemir I., Duman D. Effects of lead (Pb) and cadmium (Cd) elements on lipid peroxidation, catalase enzyme activity and catalase gene expression profile in tomato plants // *Journal of Agricultural Sciences*. 2016. № 22. P. 539–547.
25. Zhang F. Q., Wang Y. S., Lou Z. P., Dong J. D. Effect of heavy metal stress on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*) // *Chemosphere*. 2007. № 67. P. 44–50.
- phytotoxicity and physicochemical changes in plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, no. 232, pp. 1–44.
6. Anjum N. A., Sofu A., Scopa A. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, no. 22, pp. 4099–4121.
7. Arif N., Yadav V., Singh S., Kushwaha B. K., Singh S., Tripathi D. K. Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals. *Plants Responses to Xenobiotics*. Singapore, Springer, 2016, pp. 97–125.
8. Aggarwal A., Sharma I., Tripathi B. N., Munjal A. J., Baunthiyal M., Sharma V. Metal toxicity and photosynthesis. *Photosynthesis: Overviews on Recent Progress & Future Perspective*. New Delhi, International Publishing House, 2011, pp. 229–236.
9. Shul'gin I. A., Nichiporovich A. A. Raschet soderzhaniya pigmentov s pomoshch'yu nomogram [Calculation of pigments content using nomograms]. In: *Hlorofill, pod red. A. A. Slyka* [A. A. Slyk, ed. Chlorophyll]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1974, pp. 127–136 (in Russian).
10. Shvedova A. A., Polyanskii N. B. Metod opredeleniya konechnykh produktov perekisnogo okisleniya lipidov v tkanyah – fluoresciuyushchih shiffovykh osnovanij [Method of Schiff bases determination in tissues]. In: *Issledovanie sinteticheskikh i prirodnykh antioksidantov in vitro i in vivo* [Research of synthetic and natural antioxidants in vitro and in vivo]. Moscow, Nauka Publ., 1992, pp. 72–73 (in Russian).
11. Kushnareva O. P., Perekrestova E. N. Effect of different copper and lead salts concentrations on chlorophyll and carbon content in plants leaves. *Vestnik Orenburg State University*, 2015, no. 10, pp. 294–297 (in Russian).
12. Baek S., Han T., Ahn S., Kang H., Cho M. R., Lee S. Effects of heavy metals on plants growth and pigment content in *Arabidopsis thaliana*. *Plants Pathology Journal*, 2012, no. 28, iss. 4, pp. 446–452.
13. Maslennikov P. V. Response of sea pea to cadmium ions. *Aktual Problems of the Humanities and Natural Sciences*, 2013, no. 11, pp. 67–70 (in Russian).
14. Petukhov A. S., Khritokhin N. A., Petukhova G. A. Assessment of photosynthetic pigments content in plants of various species grown under anthropogenic stress. *Mezhdunarodnyi studencheskii vestnik*, 2017, no 6. Available at: <https://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=17987> (in Russian).
15. Benzarti S., Mohri S., Ono S. Plant response to heavy metal toxicity: comparative study between hyperaccumulator *Thaspicaerulescens* (Ecotype Ganges) and nonaccumulator plants: lettuce, radish, and alfalfa. *Environmental Toxicology*, 2008, no. 5, pp. 607–616.
16. Kaznina N. M., Titov A. F., Laidinen G. F., Batova Yu. V. Cadmium effect on some physiological parameters of barley plants depending on their age. *Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences*, 2010, no. 2, pp. 27–31 (in Russian).

## References

1. Rai P. K., Lee S. S., Zhang M., Tsang Y. F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management. *Environment International*, 2019, no. 125, pp. 365–385.
2. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace elements in soils and plants*. 4<sup>th</sup> ed. Boca Raton, CRC Press, 2011. 534 p.
3. Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdorani F. Review article heavy metals and some mechanisms of plant defense response. *The Scientific World Journal*, 2015, no. 4, pp. 1–18.
4. Skugoreva S. G., Ashikhmina T. Ya., Fokina A. I., Lyalina E. I. Chemical grounds of toxic effect of heavy metals (review). *Theoretical and applied ecology*, 2016, no. 1, pp. 1–10 (in Russian).
5. Shahid M., Pourrut B., Dumat C., Nadeem M., Aslam M., Pinelli E. Heavy-metal-induced reactive oxygen species:



17. Lei Y., Korpelainen H., Li C. Physiological and biochemical responses to high Mn concentrations in two contrasting *Populus cathayana* populations. *Chemosphere*, 2007, no. 68, pp. 686–694.
18. Es'kova E. N. Effect of lead accumulation on chlorophyll concentration in barley leaves. *Problemy sovremennoi agrarnoi nauki: materialy nauch.-prakt. konf. 15 okt., 2015, Krasnoyarsk* [Problems of Modern Agricultural Science: Materials of the scientific conference, 15 October, 2015, Krasnoyarsk], Krasnoyarsk, Krasnoyar. gos. agrar. un-t, 2015, pp. 21–22 (in Russian).
19. Osipova E. S. *Vliyanie neftyanigo zagryazneniya na biokh-micheskie i morfologicheskie pokazateli rastenii* [Effect of oil pollution on biochemical and morphophysiological parameters of plants]. Thesis Diss. Cand. Sci. (Biol.). Tyumen, 2013. 24 p. (in Russian).
20. Dazy M., Masfaraud J., Ferard J. Induction of oxidative stress biomarkers associated with heavy metals stress in *Fontinalis antipyretica* Hedw. *Chemosphere*, 2009, no. 75, pp. 297–302.
21. Pirselova B., Kuna R., Libantova J., Moravcikova J., Matusikova I. Biochemical and physiological comparison of heavy metal-triggered defense responses in the monocot maize and dicot soybean roots. *Molecular Biology Reports*, 2011, no. 38, pp. 3437–3446.
22. Juknys R., Vitkauskaitė G., Racaite M., Vencloviene J. The impacts of heavy metals on oxidative stress and growth of spring barley. *Central European Journal of Biology*, 2012, no. 7, iss. 2, pp. 299–306.
23. Hassanein R. A., Hashem H. A., El-Deep M. H., Shouman A. Soil contamination with heavy metals and its effect on growth, yield and physiological responses of vegetable crop plants (turnip and lettuce). *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 2013, no. 4, pp. 145–162.
24. Aydin S., Buyuk D., Gunduzer E., Buyuk P., Kandedmir I., Duman D. Effects of lead (Pb) and cadmium (Cd) elements on lipid peroxidation, catalase enzyme activity and catalase gene expression profile in tomato plants. *Journal of Agricultural Sciences*, 2016, no. 22, pp. 539–547.
25. Zhang F. Q., Wang Y. S., Lou Z. P., Dong J. D. Effect of heavy metal stress on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza*). *Chemosphere*, 2007, no. 67, pp. 44–50.

Поступила в редакцию 29.04.2020, после рецензирования 25.06.2020, принята к публикации 22.08.2020  
Received 29.04.2020, revised 25.06.2020, accepted 22.08.2020