

УДК 549.25/.29:581.526.3:556.5(476.2-2Гомель)

Мониторинг содержания тяжелых металлов в высших водных растениях водоемов г. Гомеля, испытывающих различную антропогенную нагрузку

Т.В. МАКАРЕНКО

Для кобальта, хрома, никеля и свинца отмечено однонаправленное снижение уровня содержания в растениях водоемов с 2004 г. до 2014 г. независимо от характера антропогенной нагрузки, оказываемой на водоем, что может объясняться снижением техногенного воздействия на водные экосистемы. Необходимо отметить заметный рост загрязнения кобальтом, хромом и никелем растений как водоемов городской черты, так и контрольного водоема в период с 2015 по 2017 гг., а для свинца, меди и цинка с 2015 по 2016 гг. В исследованиях установлено, что существуют две группы металлов, характеризующиеся различными механизмами накопления водной растительностью: группа I – цинк и медь; группа II – кобальт, хром, никель и свинец. Полученные в исследованиях корреляционные зависимости могут быть использованы при проведении эколого-химической оценки степени загрязнения водоемов тяжелыми металлами.

Ключевые слова: высшие водные растения, водные экосистемы, тяжелые металлы, мониторинговые исследования, корреляционные связи.

Cobalt, chromium, nickel and lead are unidirectionally decrease in water plants, which was observed in the period from 2004 till 2014, regardless of the nature of anthropogenic stress exerted on a water body, which may be explained by a decrease in the technogenic impact on aquatic ecosystems. One should observe a noticeable increase in cobalt, chromium and nickel pollution of plants of both city-level reservoirs and the control reservoir in the period from 2015 to 2017, and for lead, copper and zinc from 2015 to 2016. It was found that there are two groups of metals characterized by various mechanisms of accumulation of aquatic vegetation: group I – zinc and copper; group II – cobalt, chromium, nickel and lead. The correlational dependencies obtained in the studies may be used in the environmental and chemical assessment of the degree of water bodies pollution with heavy metals.

Keywords: higher aquatic plants, aquatic ecosystems, heavy metals, monitoring studies, correlational dependencies.

Введение. Для крупных городов с многопрофильной промышленностью характерно присутствие в окружающей среде не отдельного загрязнителя, а ассоциации загрязнителей, способных оказывать комбинированное действие на организм, при котором может наблюдаться как суммирование эффектов, так и их потенцирование [1]. Высшие водные растения удовлетворяют многим требованиям, предъявляемым к биоиндикаторам загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами, среди которых повсеместная встречаемость, высокая численность, удобство сбора и обработки, относительно крупные размеры. Занимая прибрежную часть водоема, водные растения служат своеобразным барьером, предотвращающим проникновение в водоемы и водотоки недостаточно очищенных сточных вод.

Цель работы – анализ содержания тяжелых металлов в высших водных растениях водоемов г. Гомеля, испытывающих различную антропогенную нагрузку.

Материалы и методы. Отбор проб высших водных растений производился с мая по август 2004–2017 гг. в водоемах г. Гомеля, различающихся по характеру антропогенной нагрузки. Для проведения сравнительной характеристики был выбран контрольный водоем (контроль), который не испытывает видимой антропогенной нагрузки и расположен на 15 км выше города по течению р. Сож. В процессе выполнения работы собраны макрофиты, широко распространенные в водоемах Беларуси. Анализировалась надземная часть макрофитов. Пробы растений после тщательного ополаскивания последовательно высушивали до воздушно-сухого состояния и озоляли до белой золы в муфельной печи при 450оС [2].

Содержание металлов в золе растений и донных отложений определяли атомно-эмиссионным спектральным методом на спектрофотометре PGS-2 в лаборатории физико-химического анализа Республиканского унитарного предприятия «Белорусский научно-исследовательский геологоразведочный институт».

Результаты и их обсуждение. Поступление загрязнителей в водоемы городской зоны сопровождается изменением их содержания в различных компонентах водной экосистемы, в том числе и в высших водных растениях. При этом колебание содержания элементов в донных отложениях и воде, изменение степени их биологической доступности по мере фиксации в составе донных отложений и включения в миграционные процессы биогеоценоза отображается на многолетней динамике накопления этих элементов растениями.

В ходе исследований были получены данные по загрязненности тяжелыми металлами растений, произрастающих в водоемах г. Гомеля за период наблюдений с 2004 по 2017 гг. Необходимо отметить, что для нивелирования значительной вариабельности показателей у представителей различных водных растений было проведено усреднение результатов анализа содержания металлов, обобщенные данные приведены на рисунках 1–6.

Проведенный анализ концентрации тяжелых металлов в растениях водоемов г. Гомеля показал, что, в целом, загрязнение растительности городских водоемов выше, чем контрольного водоема, расположенного вне зоны влияния промышленных предприятий и городского комплекса г. Гомеля. Наиболее существенная разница между содержанием металлов в растениях городских водоемов и в контрольном водоеме обнаружена при анализе концентрации хрома и никеля. В среднем, за наблюдаемый период различия для данных металлов достигали 4-х кратного уровня, а максимальные различия составляли 6,2 раза. Также выявлено довольно существенное превышение контрольных уровней (в 2,0 раза и более) меди, цинка, кобальта и свинца для водной растительности водоемов г. Гомеля.

Анализируя годовую динамику содержания тяжелых металлов в растениях можно отметить незначительное снижение загрязнения цинком и медью растений как водоемов городской черты, так и контрольного водоема с 2004 по 2014 гг. Однако за период исследований с 2015 по 2016 гг. ярко выражена тенденция повышения содержания меди и цинка в макрофитах всех изучаемых водоемов (рисунки 1, 2). Так, результаты мониторинга показали, что концентрация меди и цинка в растениях городских водоемов в 2016 г. возросла, в среднем, в 4,9 раза, по сравнению с данными, полученными в период с 2004 г. по 2015 г. Аналогичная закономерность обнаружена и при анализе содержания металлов в макрофитах контрольного водоема: концентрация меди и цинка в растениях повысилась, в среднем, в 5,5 раза.

Факт роста загрязнения растительности всеми изучаемыми металлами, выявленного в проведенных исследованиях как в водоемах, находящихся в зоне техногенного влияния, так и на относительно благополучной в экологическом аспекте территории объяснить затруднительно. Можно предложить, что существуют, по крайней мере, две причины, объясняющие повышенное в последние годы накопление изучаемых металлов водной растительностью. Во-первых, глобальные атмосферные выпадения веществ, содержащих тяжелые металлы. Известно, что значительная часть техногенных выбросов тяжелых металлов, поступающих в атмосферу в виде аэрозолей, может переноситься на большое расстояние и вызывать глобальное загрязнение [3]. Во-вторых, повышение накопления металлов в водных растениях может быть вызвано процессами, происходящими непосредственно в самих водоемах. Так, увеличение биодоступности тяжелых металлов в донных отложениях происходит при условиях, когда абсорбционная способность донных отложений исчерпывается и, кроме того, доступные формы различных загрязнителей переходят в воду, откуда легко поступают в ткани водных растений. Этому способствует повышение кислотности воды, сильное зарастание водоемов, интенсификация выделения CO_2 в результате деятельности микроорганизмов. Изменение биологической доступности соединений металлов в компонентах водоемов могло быть вызвано снижением уровня воды в водных экосистемах г. Гомеля по данным гидрометеоцентра с 2013 по 2016 гг. практически на 1,2 метра, а в некоторых водоемах и более (максимальное падение уровня воды отмечено в 2016 г.), что повлекло за собой изменение физико-химических показателей состояния водоема [4]. В донных отложениях водных экосистем в данный период содержание металлов снизилось [5]. Вероятнее всего, произошло перераспределение соединений металлов в компонентах водоема и из донных отложений они перешли в водные массы водоема в доступных для живых организмов формах. Для проверки данных гипотез необходимы дополнительные исследования.

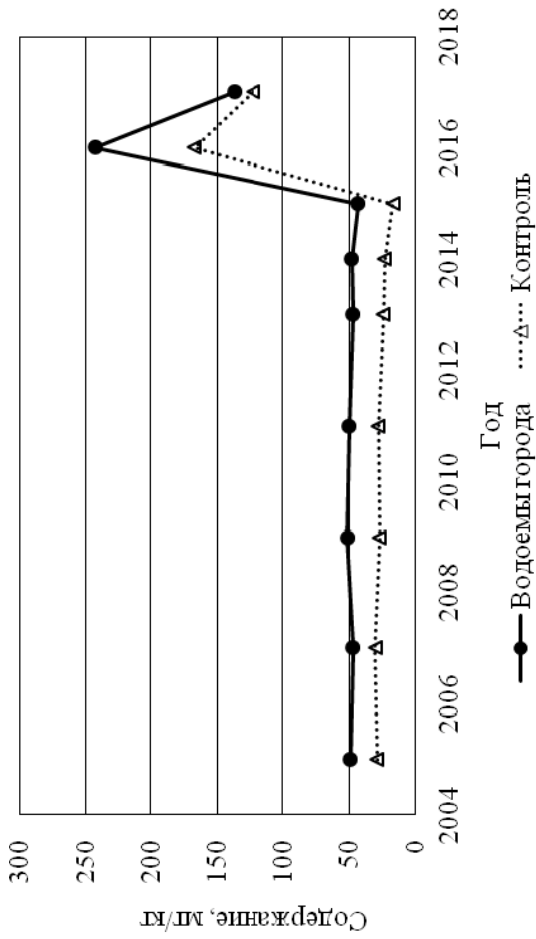


Рисунок 1 – Сравнительная динамика содержания меди в водных растениях в городских водоемах и контрольном водоеме

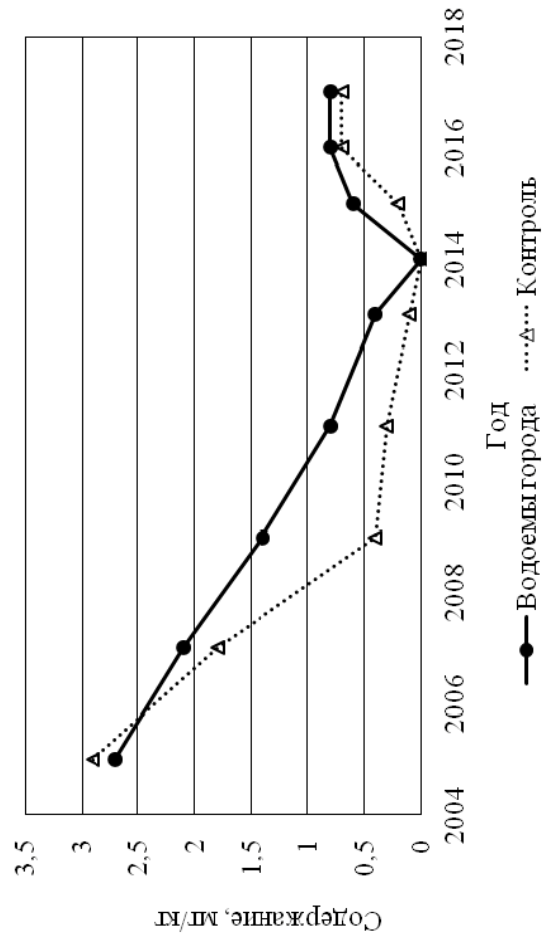


Рисунок 3 – Сравнительная динамика содержания кобальта в водных растениях в городских водоемах и контрольном водоеме

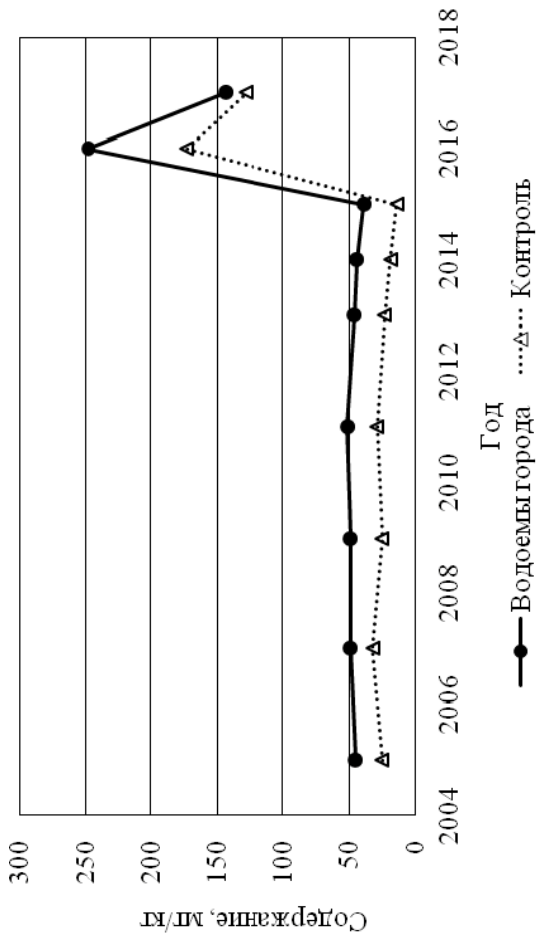


Рисунок 2 – Сравнительная динамика содержания цинка в водных растениях в городских водоемах и контрольном водоеме

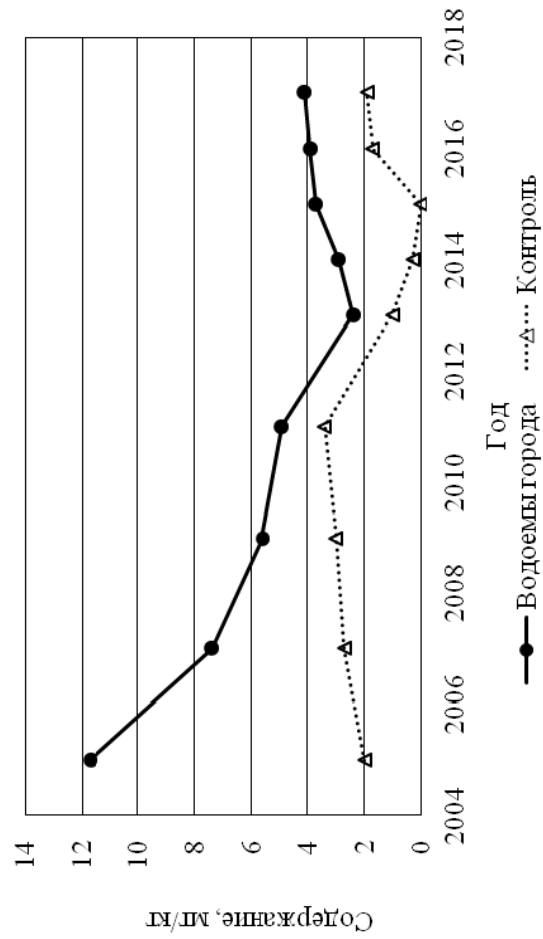


Рисунок 4 – Сравнительная динамика содержания хрома в водных растениях в городских водоемах и контрольном водоеме

В 2017 г. содержание меди и цинка в растениях всех изучаемых водоемов значительно снизилось, что также может быть связано с погодными условиями, в частности, с увеличением количества осадков, и, следовательно, поступлением большого количества поверхностного стока в водоем, что вызывает так называемый «эффект разбавления» загрязненной воды водоема. Но с поверхностным стоком в водоемы могут поступать новые «порции» загрязненных веществ. Как было сказано выше, все это требует более детального изучения. Для других металлов, за исключением свинца, снижение их концентрации в растениях после 2016 г. не отмечалось.

Содержание кобальта в растениях как городских водоемов, так и в контрольном водоеме резко снижалось в период с 2004 г. по 2012 г. и в 2014 г. было ниже предела обнаружения (рисунок 3). Этот факт однозначно свидетельствует о снижении техногенного воздействия на водоемы исследуемой территории. Но с 2015 г. концентрация металла в макрофитах начинает увеличиваться, и в дальнейшем отмечена тенденция к незначительному росту содержания кобальта в растениях городских водоемов и контрольного водоема.

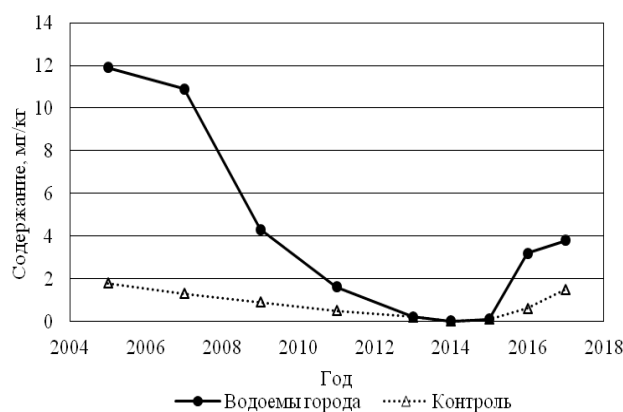


Рисунок 5 – Сравнительная динамика содержания никеля в водных растениях в городских водоемах и контрольном водоеме

Концентрация хрома в растениях водоемов города до 2015 г. резко снижалась, различия в содержании металла в макрофитах в 2004 г. и в 2014 г. составляли 6 раз (рисунок 4), но в контрольном водоеме отмечался рост концентрации хрома до 2014 г. (в 1,8 раза выше, в сравнении с 2004 г.). В литературе описываются примеры, когда в экосистемах с низким содержанием загрязнителей в абиотических компонентах живые организмы накапливали токсиканты до высоких уровней, тогда как в загрязненных системах организмы включали механизм блокировки и токсиканты поступали избирательно в ткани животных и растений и уровень концентрации поллютантов был гораздо ниже, чем в чистых зонах [6]. Начиная с 2015 г. в городских водоемах отмечался рост содержания хрома в растениях, тогда как в контрольном водоеме с 2014 г. резко снижалась концентрация соединений металла и в 2015 г. в макрофитах уровень содержания хрома был ниже предела обнаружения. Такое разнохарактерное изменение в концентрации вышеназванного металла в растениях водоемов города и контрольного водоема, скорее всего, связано с внутриводоемными процессами и, в меньшей степени, с характером антропогенной нагрузки, которую испытывают водоемы.

Для никеля, как и для других металлов, характерно уменьшение содержания в макрофитах изучаемых водоемов до 2014 г. (рисунок 5). И если для растений контрольного водоема, расположенного вне зоны техногенного воздействия, концентрация уменьшилась к 2012 г., в среднем, в 2,2 раза, то для водоемов зоны воздействия промышленных предприятий Гомеля снижение содержания составило 11,7 раза, что свидетельствует, как и в случае с кобальтом, о снижении поступления соединений никеля в изучаемые водоемы. К 2014 г. концентрация металла в макрофитах всех водоемов настолько уменьшилась, что стала ниже предела обнаружения, но в 2016 г. уровень содержания никеля в растениях непроточных водоемов города с малой площадью водного зеркала вырос до 4,2 мг/кг сухой массы, а в среднем до 3,2 мг/кг. В контрольном водоеме рост концентрации металла в растениях был не столь значителен, и концентрация достигла величины 1,7 мг/кг сухой массы.

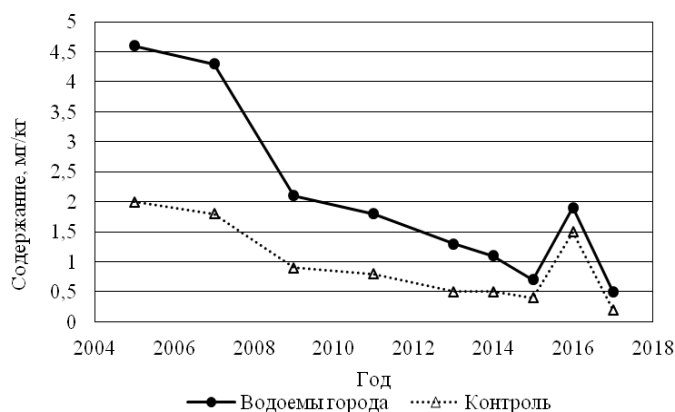


Рисунок 6 – Сравнительная динамика содержания свинца в водных растениях в городских водоемах и контрольном водоеме

Уровень загрязнения свинцом растений городских водоемов с 2004 г. по 2015 г. снизился практически в 6,0 раз, а для растений контрольного водоема – в 4,5 раза (рисунок 6). Однако, как и для всех металлов, в 2016 г. наблюдалось увеличение содержания элемента в растениях примерно в 2,5 раза. Также, как и для меди и цинка, содержание свинца снизилось к 2017 г. Возможно, медь, цинк и свинец поступали в растения в большей степени вследствие протекания в водоемах сложных процессов перераспределения соединений металлов между водой и донными отложениями при значительном снижении уровня воды в водных экосистемах. Известно, что при определенных условиях донные отложения могут выступать источниками вторичного загрязнения водоемов, причем металлы выходят из донных отложений в формах более доступных для биоты, чем поступают в водоемы извне [7]. Остальные изучаемые металлы поступали в растения исследуемых водоемов не только из донных отложений, но и имели приток извне с поверхностным стоком, а также с загрязненными сухими и влажными осадками на поверхность водоема.

В общем случае взаимосвязь и взаимовлияние тяжелых металлов в процессе накопления их растениями можно охарактеризовать с помощью корреляционных соотношений концентраций данных элементов. Для расчетов значений коэффициентов корреляции использовались усредненные данные содержания металлов в растениях всех обследуемых водоемов. Полученные коэффициенты корреляции для растительности городских водоемов и контрольного водоема приведены в таблицах 1 и 2. Из таблицы 1 видно, что у растений, произрастающих в водоемах городской черты, существуют достаточно четкие взаимосвязи содержания металлов. Высокая степень прямой корреляционной связи наблюдалась между содержанием меди и цинка ($r = 0,74$), никеля и свинца ($r = 0,96$), никеля и хрома ($r = 0,93$); никеля и кобальта ($r = 0,71$), свинца и хрома ($r = 0,94$), хрома и кобальта ($r = 0,91$).

Таблица 1 – Значения коэффициента корреляции r между содержанием изучаемых металлов в водных растениях водоемов г. Гомеля

| Элемент | Медь | Цинк | Кобальт | Хром | Никель |
|---------|-------|-------|---------|------|--------|
| Свинец | -0,44 | -0,07 | 0,70 | 0,94 | 0,96 |
| Никель | -0,33 | -0,02 | 0,71 | 0,93 | – |
| Хром | -0,41 | -0,30 | 0,91 | – | – |
| Кобальт | -0,58 | -0,68 | – | – | – |
| Цинк | 0,74 | – | – | – | – |

Таблица 2 – Значения коэффициента корреляции r между содержанием изучаемых металлов в водных растениях контрольного водоема

| Элемент | Медь | Цинк | Кобальт | Хром | Никель |
|---------|-------|-------|---------|-------|--------|
| Свинец | 0,08 | 0,16 | 0,61 | -0,27 | 0,89 |
| Никель | -0,02 | -0,01 | 0,94 | 0,05 | – |
| Хром | -0,60 | -0,71 | 0,30 | – | – |
| Кобальт | -0,34 | -0,34 | – | – | – |
| Цинк | 0,99 | – | – | – | – |

Очевидно, существует высокая степень синергизма в потреблении данных элементов растениями. В то же время отмечены отрицательные корреляционные связи между медью, с одной стороны, и свинцом, никелем, хромом, кобальтом – с другой (значение коэффициент корреляции r составляет $-0,44$; $-0,33$; $-0,41$; $-0,58$ соответственно). Также характеризуются противоположными тенденциями в накоплении растениями цинк и кобальт, цинк и хром. Для пар цинк-свинец и цинк-никель корреляция не установлена ($r = 0,07$ и $0,02$ соответственно). Аналогичные закономерности выявлены при анализе корреляционных связей в накоплении металлов растениями из контрольного водоема (таблица 2).

На основании результатов корреляционного анализа можно сделать вывод, что существуют, по крайней мере две группы металлов, характеризующиеся различными механизмами накопления водной растительностью: группа I – цинк и медь, группа II – кобальт, хром, никель, свинец. Таким образом, данные корреляционного анализа также подтверждают показанную выше разнонаправленность процессов, влияющих на динамику содержания тяжелых металлов в высшей водной растительности водоемов г. Гомеля.

Заключение. Проведенный анализ динамики содержания тяжелых металлов в высших водных растениях, произрастающих в водоемах г. Гомеля, показал, что за период с 2004 г. по 2017 г. концентрация в растениях всех анализируемых металлов претерпела существенные изменения. Для кобальта, хрома, никеля и свинца отмечено однонаправленное снижение уровня содержания в растениях водоемов до 2014 г. независимо от характера антропогенной нагрузки, оказываемой на водоем (исключение – хром в макрофитах контрольного водоема), что может объясняться снижением техногенного воздействия на водные экосистемы. Необходимо отметить заметный рост загрязнения кобальтом, хромом и никелем растений как водоемов городской черты, так и контрольного водоема в период с 2015 по 2017 гг., а для свинца, меди и цинка с 2015 по 2016 гг. Данный факт требует дальнейших более детальных исследований, но можно предположить, что в большей степени, чем техногенное воздействие на повышение содержания свинца, меди и цинка в 2016 г. и дальнейшее снижение их концентрации в 2017 г. (что не отмечено для других изучаемых металлов) повлияли внутри-водоемные процессы перераспределения металлов между водой и донными отложениями, вызванные падением уровня воды в исследуемых водных экосистемах.

Растения городских водоемов загрязнены соединениями металлов в большей степени, чем в контрольном водоеме, что указывает на влияние Гомельского промышленного комплекса на экосистемы города.

Обнаружена высокая степень прямой корреляционной связи между содержанием в водных растениях меди и цинка, никеля и свинца, никеля и хрома, никеля и кобальта, свинца и хрома, хрома и кобальта. Исследованиями установлено, что существуют две группы металлов, характеризующиеся различными механизмами накопления водной растительностью: группа I – цинк и медь; группа II – кобальт, хром, никель и свинец. Полученные корреляционные зависимости могут быть использованы при проведении эколого-химической оценки степени загрязнения водоемов тяжелыми металлами.

Литература

1. Безель, В.С. Химическое загрязнение среды: вынос химических элементов надземной фитомассой травянистой растительности / В.С. Безель, Т.В. Жуйкова // Экология. – 2007. – № 4. – С. 259–267.
2. Никаноров, А.М. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах / А.М. Никаноров, А.В. Жулидов, А.Д. Покаржевский. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 143 с.
3. Баглаева, Е.М. Пространственная структура техногенного загрязнения снегового покрова промышленного города и его окрестностей растворимыми и нерастворимыми формами металлов / Е.М. Баглаева, А.П. Сергеев, А.Н. Медведев // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2012. – № 4. – С. 326–335.
4. Интернет-портал республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс] / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Режим доступа : <http://www.pogoda.by/gidroarchive>. – Дата доступа : 03.08.2017.

5. Макаренко, Т.В. Динамика содержания тяжелых металлов в донных отложениях и водных растениях р. Сож в районе Гомеля / Т.В. Макаренко, А.С. Косматьков // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. – 2018. – № 1. – С. 48–60.

6. Головатый, С.Е. Научные основы минимизации накопления тяжелых металлов в растениеводческой продукции на дерново-подзолистых почвах : автореф. дис. ... д. сельскохозяйств. наук : 06.01.04 / С.Е. Головатый ; НИРУП Ин-т почвовед. и агрохим. НАН Беларуси. – Минск, 2003. – 47 с.

7. Болдырев, К.А. Методика расчета выхода тяжелых металлов из слоя донных отложений водоемов / К.А. Болдырев, В.В. Кузьмин, Н.П. Куранов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 6. – С. 43–47.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 30.09.2019

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ