

БРИОИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУХА КРУПНОЙ УРБОЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ Г. ОРЛА)

Анищенко Л.Н.¹, Злыднев А.А.¹, Москаленко И.В.¹

¹ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского», Брянск, e-mail: eco_egf@mail.ru

Представлены показатели концентрации элементов группы тяжёлых металлов (химическая бриоиндикация) в побеговой фитомассе *Pylaisia polyantha*, *Orthotrichum obtusifolium* для местообитаний города Орла как «показательных» видов для бриоиндикации. Установлены аккумулятивные возможности бриофитов по отношению к 12 тяжёлым металлам в валовой концентрации (мг/кг). Биологический ряд содержания тяжёлых металлов в образцах *Pylaisia polyantha*, *Orthotrichum obtusifolium*: железо > марганец > цинк > стронций > медь > свинец > хром > никель > мышьяк > кобальт > ванадий (титан). Индекс концентрирования – $1,73 \pm 0,3$, что подтверждает изменение наземно-воздушной среды обитания в крупной урбоэкосистеме Черноземья РФ. Биологический ряд накопления трансграничных поллютантов в побегах зелёных мхов с использованием коэффициентов накопления: железо > медь > марганец > стронций > цинк > никель > свинец > хром > мышьяк > ванадий (титан, кобальт). Установлено, что накопление видами тяжёлых металлов – это не видовой признак. Для местообитаний г. Орла валовые концентрации тяжёлых металлов в гаметофитах мхов ниже для всех элементов по сравнению с аналогичными данными по г. Брянску. Малоподвижные тяжёлые металлы – никель, титан, ванадий, хром, а также свинец и мышьяк – не накапливаются изученными бриофитами в отличие от ранее изученных сосудистых растений. Для местообитаний города Орла ни пилезия многоцветковая, ни ортотрих туполистный не могут быть использованы как биоиндикаторы согласно коэффициентам накопления ($K_n < 2$). Территории по содержанию тяжёлых металлов представлены в картографическом материале, который может быть использован как дополнительный источник при оформлении материалов ОВОС промышленных и иных объектов (раздел «Состояние атмосферного воздуха»).

Ключевые слова: мохообразные, бриоиндикация, тяжелые металлы, Орловская область.

BRIOINDICATION AIR CONDITION OF THE LARGE URBAN ECOSYSTEM (FOR EXAMPLE ORYOL)

Anishchenko L.N.¹, Zlydnev A.A.¹, Moskalenko I.V.¹

¹Bryansk State Academician I. G. Petrovsky University, Bryansk, e-mail: eco_egf@mail.ru

The generalized data on chemical briindication using background epiphytic species of green mosses are presented: *Pylaisia polyantha*, *Orthotrichum obtusifolium* for the habitats of the city of Oryol. The accumulative capacity of bryophytes in relation to the 12 elements of the group of heavy metals in gross concentration (mg / kg) is established. The coefficients of concentration of elements of a group of heavy metals are calculated as the concentrations in the runaway mass of samples are reduced to the concentration in the cortex of forophytes. A number of gross concentrations of heavy metals by briophytes have been revealed: Fe> Mn> Zn> (Sr)> Cu> Pb> Cr> Ni> As> Co> V (Ti). The concentration index is 1.73 ± 0.3 , which is confirmed by the change in the land-air habitat in a large city of the Chernozem region of the Russian Federation. A number of heavy metals accumulation in the phytomass of gametophytes of green mosses according to the accumulation coefficients are represented by a series: Fe> Cu> Mn> Sr> Zn> Ni> Pb> Cr> As> V (Ti, Co). The accumulation of heavy metals is not a specific feature. For the habitats of the town of Orel, the gross concentrations of heavy metals in mosses are lower for all elements compared to similar data for Bryansk. Green mosses, unlike vascular plants, do not accumulate lead, arsenic, as well as vascular plants do not accumulate nickel, titanium, vanadium, chromium. In the city of Oryol, none of the two epiphytic species studied can be used as a bioindicator ($RN < 2$). Mapping the content of TM in epiphytic mosses allowed to conduct territorial zoning of the territory of the large city of Oryol for general air pollution.

Keywords: mosses, brioindication, heavy metals, Oryol region.

В настоящее время бриологические исследования в городах России и зарубежья решают разносторонние задачи: от выявления флоры мохообразных до проведения биоиндикационных и экоаналитических изысканий, представляющих комплексный

мониторинг. Для крупных городов – Брянска, Ростова-на-Дону, Красноярска, городов Новосибирской агломерации – количественная бриоиндикация включает расчёт синтетических индексов (по аналогии с лишеноиндикацией), а также получение химико-аналитических отчётов по содержанию поллютантов в гаметофитах бриофитов. Это относительно новое направление в биомониторинге даёт возможности более качественно картировать территории урбоэкосистем по уровню общего загрязнения, готовить материалы для разделов ОВОС по состоянию окружающей среды. Исследование бриофлоры г. Орла и применение её в химической бриоиндикации – основное направление комплексного мониторинга в Черноземье РФ. Элементы группы тяжёлых металлов (ТМ) отнесены к группе приоритетных загрязнителей, концентрация которых отслеживается и международными экологическими службами в рамках глобального мониторинга в почве, воде, донных отложениях и воздухе как трансграничных загрязнителей [1; 6; 9; 12; 13; 15]. Мохообразные выступают аккумулятивными биоиндикаторами, гаметофит которых поглощает поллютанты, широко распространены и формируют сукцессионные сообщества в различных местообитаниях. Региональные особенности бриоиндикаторов, их видовой состав, пределы накопительных возможностей рекомендованных к использованию видов еще предстоит изучить [2; 3]. Для местообитаний г. Орла как крупной урбоэкосистемы проведение диагностических мероприятий по химической бриоиндикации общего состояния воздуха достаточно актуальная задача, решение которой позволит сравнить экоаналитические данные в крупных городах, упростить проведение процедуры ОВОС. Цель работы – представить данные по аккумулятивным возможностям фоновых эпифитных мхов по отношению к группе трансграничных поллютантов (тяжёлых металлов) как основы биомониторинга города Орла (Черноземье РФ).

Материалы и методы исследования. Так же как и в ранее выполненных исследованиях для города Брянска, в настоящей работе для экоаналитических изысканий отбирались гаметофиты (побеговая биомасса) наиболее распространённых (фоновые) видов-эпифитов: *Pylaisia polyantha* (Hedw.) B.S.G., *Orthotrichum obtusifolium* Brid., одномоментно – и образцы коры деревьев-форофитов. Для установления валового содержания элементов группы тяжёлых металлов (ТМ) фитопробы мхов и сосудистых растений отбирались в 98 учётных квадратах в соответствии с международными методическими рекомендациями [10; 13].

В местообитаниях г. Орла – рекреационных зонах, промышленных, промышленно-автотранспортных, селитебных районах – методом трансект (маршрутного хода) в каждом из административных районов обследовано по 60 особей древесных растений на высоте до 2,0 метров, равномерно освещённые, без искривлений и видимых повреждений. Для изъятия

бриофитов на высоте использовался скребок. Фитообразцы эпифитной бриофлоры отбирали на коре лиственных видов – *Acer platanoides* L., *Populus tremula* L., *P. nigra* L., *Quercus robur* L. Отобранная фитомасса мхов и древесной коры высушивалась на воздухе, а затем в сушильном шкафу (при температуре 100-105 °С); сухую биомассу подвергали камеральной обработке и пробоподготовке для дальнейшего анализа методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (спектрометр «Спектроскан-Макс») [8]. Все вышеописанные этапы подготовки фитопроб проводили в соответствии с ОСТ 10259-2000. Проанализировано 193 образца фитомассы зелёных мхов и столько же коры древесных видов-субстратов (форофитов) для эпифитов. Фоновые концентрации ТМ определены в лесных сообществах урочища Рыжуха (Навлинский район, Брянская область). Для установления индикационной значимости видов рассчитывались коэффициенты накопления (Кн): как отношение концентрации определённого ТМ в фитомассе мхов к концентрации элемента в коре форофита [7]. Индекс концентрирования ТМ вычислялся как частное от валового содержания ТМ (мг/кг) и Сф – валового содержания ТМ на фоновой территории, отнесённое к числу определяемых элементов группы тяжёлых металлов. Номенклатура мхов указана по списку мохообразных Восточной Европы и Северной Азии [5]. Карты построены с применением метода псевдоизолиний в программе MapInfo 11.0.

Результаты и их обсуждение. Для местообитаний города Орла, имеющего аналогичную г. Брянску пространственную структуру, сходные климатические показатели, видовой спектр зелёных насаждений, выбраны биоиндикаторами фоновые эпифитные мхи, ответная реакция которых стимулируется не только состоянием воздушной среды, но и субстратов их произрастания: древесных видов-форофитов, что неоднократно было установлено российскими и зарубежными авторами [6; 11; 12].

Эпифитные зелёные мхи – концентраторы 10 ТМ: в фитомассе двух видов валовое содержание ванадия и титана ниже предела обнаружения прибора, для других поллютантов данные отражены ниже (табл. 1, рис. 1-3).

Таблица 1

Диапазон валового содержания ТМ в побегах *Pylaisia polyantha* и *Orthotrichum obtusifolium* в местообитаниях г. Орла

№	Валовое содержание ТМ в фитомассе фоновых видов (M ±m, мг/кг)									
	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Cr	Ni	Mn	Fe	Co
1*	28,0±2,5 - 80,0±10,8	5,2±0,8 - 29,0±2,3	0,9±0,2 - 2,0±0,2	17,3±1,7 - 55,4±5,6	11,0±1,3 -32,0±3,0	15,0 ±1,3 - 30,0±3,1	9,2±1,0 - 16,0±2,0	233,0±12,0 - 850,0±14,0	900,0±15,0 - 12000,0±19, 0	0
2	29,4±2,8 - 74,5±9,3	5,9±0,9 - 26,0±2,1	1,1±0,2 - 2,3±0,3	18,4±1,5 - 50,0±4,1	10,5±1,2 -34,0±3,2	15,9 ±1,7 - 29,0±3,3	10,0±1,1 - 13,5±2,9	238,0±12,7 - 833,0±13,5	939,0±15,9 - 11840,0±17, 5	1,3± 0,2

Примечание. * Фитомасса зелёных мхов: 1 – *Pylaisia polyantha*, 2 – *Orthotrichum obtusifolium*.

Для некоторых трансграничных поллютантов определено превышение фоновых значений концентрации в гаметофитах двух фоновых эпифитных бриофитов: для свинца максимальное – в 0,9 раза, для мышьяка – в 3,7 раза, для цинка – в 2,0 раза, для стронция – в 0,5 раза, железа – в 1,6 раза. Для марганца, никеля (ванадия и титана соответственно при невозможном установлении концентрации) увеличение концентрации по сравнению с фоновыми не обнаружено. Антропогенные источники загрязнения воздуха определили повышенные концентрации небιοгенных ТМ (мышьяка, свинца) по сравнению с фоновыми местообитаниями для мхов.

Гаметофиты *Pylaisia polyantha* и *Orthotrichum obtusifolium* содержат валовую концентрацию ТМ, по численному выражению различающуюся у видов статистически недостоверно ($t_{\text{практ}} < t_{\text{теор}}$). Биологический ряд валовой концентрации (мг/кг) 12 элементов группы тяжёлых металлов в фитомассе мхов представлен: железо > марганец > цинк > стронций > медь > свинец > хром > никель > мышьяк > кобальт > ванадий (титан).

Сравнительная характеристика валовых концентраций ТМ в фитообразцах видов эпифитной (г. Орёл РФ, г. Брянск, РФ, г. Ростов-на-Дону, РФ) и эпигейной (г. Николаевка, Украина) бриофлоры показала следующее [3; 4; 14]. В фитомассе *Bryum argenteum* Hedw. концентрируются разнообразные элементы, но валовое содержание Си выше (статистически недостоверно) зарегистрированных концентраций этого ТМ в фитомассе пилезии многоцветковой и ортотриха туполистного. Концентрации Zn и Pb в гаметофитах эпигейного и эпифитных видов достоверно различны. Брий серебристый – толерантный к загрязнителям вид, в последующем необходимо разработать программу по включению в биомониторинг исследования этого вида, так как аккумулятивные особенности мхов определяются не только видовой принадлежностью, но и местообитаниями, и экологическими абиотическими факторами в них.

Для пилезии многоцветковой как вида биотеста состояния воздуха г. Ростова-на-Дону [4] значения валовой концентрации всех ТМ выше (от 1,5 до 3,0 раз), чем установленное содержание поллютантов для местообитаний г. Орла, что, вероятно, обусловлено различной типологией промышленных производств в городах. При исследовании в г. Ростове-на-Дону выявлена значительная аккумуляция в фитомассе пилезии многоцветковой Zn – биогенного элемента, и других небιοгенного происхождения ТМ – Cr, Pb. При исследовании образцов мха в г. Брянске также не обнаружено концентрирование небιοгенных элементов, в том числе и V с Ti: их концентрация ниже предела обнаружения прибора.

Для местообитаний г. Орла валовые концентрации ТМ в гаметофитах мхов ниже для всех элементов по сравнению с аналогичными данными по г. Брянску. Статистически достоверные отличия ($t_{\text{практ}} > t_{\text{теор}}$) зарегистрированы для Zn, Cr, Ni, Co [3]. При условии,

что у лишайников накопление загрязнителей в бóльшей степени определяется климатическими показателями по сравнению со мхами, для городов Брянска и Орла показано превышение валового содержания всех ТМ (Pb, Cu, Sr, Co, Ni, Cr, As, Zn, Mn, V, Ti) в слоевищах фоновых эпифитных лишайников по сравнению с эпифитными мхами, валовая концентрация Fe выше у зелёных мхов в Орле [2].

Зоны (территории с различным содержанием ТМ в фитомассе гаметофитов мхов), выделенные методом псевдоизолиний, делят территорию г. Орла по состоянию воздуха, косвенно определяющуюся малым, средним и выше среднего содержанием загрязнителей (мг/кг). Для некоторых поллютантов карты зон по концентрации ТМ показаны на рисунках 1-3. В автотранспортных зонах в образцах пилезии и ортотрихума превышено содержание Cu, Fe, Mn по сравнению с рекреационной; в районах с сочетанной промышленной и автотранспортной нагрузкой – увеличена валовая концентрация Ni, Cu, Zn. Для г. Брянска показаны практически аналогичные результаты, для фитопроб пилезии многоцветковой в г. Ростов-на-Дону – в местообитаниях с сочетанной нагрузкой увеличено содержание в гаметофитах мха-биоиндикатора V, Pb, Zn, Sr, Ni.

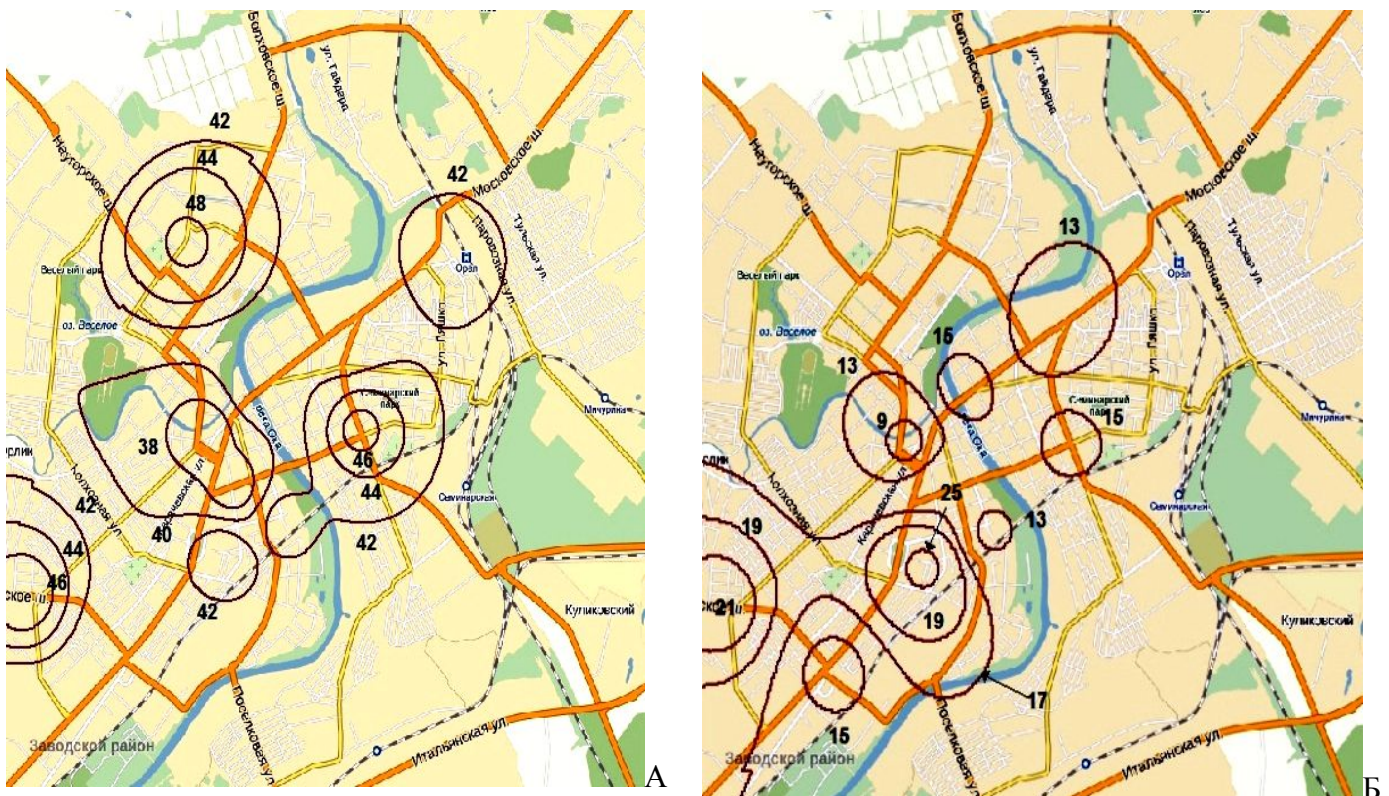


Рис. 1. Карта-схема валового содержания тяжёлых металлов (мг/кг) в побегах эпифитных мхов г. Орла: (А) цинка; (Б) меди. Масштаб 1:64 000



Рис. 2. Карта-схема валового содержания тяжёлых металлов (мг/кг) в побегах эпифитных мхов г. Орла: (А) свинца; (Б) хрома. Масштаб 1:64 000

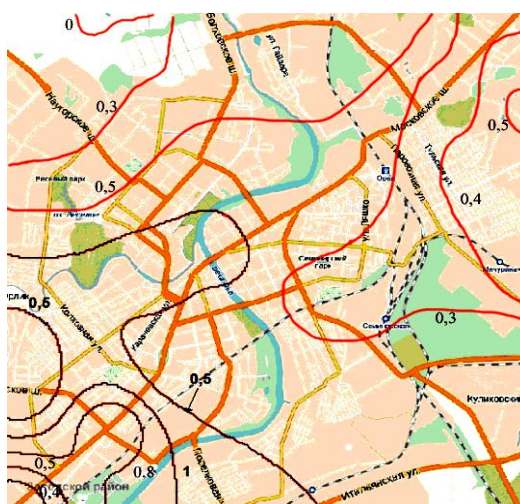


Рис. 3. Карта-схема валового содержания кобальта (мг/кг) в побегах эпифитных мхов г. Орла. Масштаб 1:64 000

Разделение территории крупной урбоэкосистемы на зоны проведено по валовому содержанию и коэффициентам концентрации загрязнителей, чётко очерчены в картографическом материале (рис. 1-3) изолиниями. Промышленные и районы с сочетанной промышленно-транспортной нагрузкой выделены по повышенной концентрации ТМ, которые, вероятно, определяются господствующей розой ветров, источниками загрязнения. Картирование общего состояния сред обитания в г. Орле по биологическому накоплению трансграничных загрязнителей – продолжение биомониторинга трансграничных загрязнителей экоаналитическим методом на основе рентгенофлуоресцентной спектроскопии (рис. 1-3).

Валовые концентрации и коэффициенты накопления показывают высокую поглотительную способность *Pylaisia polyantha* и *Orthotrichum obtusifolium* по отношению к ТМ, выявляют изменение общего состояния сред обитания в антропогенно преобразованных экосистемах, подтверждены индексом концентрирования (для двух видов) – $1,72 \pm 0,3$. Коэффициенты накопления ТМ показаны в таблице 2.

Таблица 2

Разнообразие коэффициентов накопления в фитомассе фоновых видов мхов

Виды*	Коэффициенты накопления ТМ											
	Sr	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	Mn	Cr	V	Ti
1	1,10	0,54	0,40	1,32	1,72	0,83	0	1,83	1,12	0,53	0	0
2	1,14	0,58	0,45	1,18	1,87	0,71	0	1,53	1,36	0,44	0	0

Примечание. * Обозначения как в таблице 1.

Коэффициенты накопления позволили установить экологический ряд, показывающий накопительную способность зелёных мхов. Для образцов *Orthotrichum obtusifolium*: $Fe > Cu > Zn > Sr(Mn)$, для *Pylaisia polyantha* $Cu > Fe > Mn > Zn (Sr)$. Выявлено отсутствие аккумуляции в фитомассе бриофитов As, Pb, Ni, Ti, V, Cr, что подтверждено исследованиями и для сосудистых растений крупной урбоэкосистемы Брянска [2]. Для двух видов мхов установлено сопряжённое накопление ТМ – железо–марганец, цинк–медь. Наименьшие Кн рассчитаны для As, Pb, Cr как малоподвижных в химическом отношении элементов. Для *Orthotrichum obtusifolium* численные значения Кн выше, чем для *Pylaisia polyantha*. Ни один из исследуемых видов для г. Орла не может быть указан как индикаторный (чувствительный) вид, т.к. $Кн < 2$. Экологический ряд накопления ТМ в фитомассе зелёных мхов следующий: $Fe > Cu > Mn > Sr > Zn > Ni > Pb > Cr > As > V (Ti, Co)$. Для местообитаний г. Брянска и г. Орла у фитомассы и пилезии многоцветковой, и ортотрихума туполистного совпадают значения Кн по Fe, Cu, Mn, Sr [2]. Эссенциальные элементы Fe и Mn аккумулируются в гаметофитах вследствие их широкого участия в метаболических процессах растений, поглощение Sr обусловлено высокой химической подвижностью элемента.

Для г. Ростова-на-Дону и г. Орла биологические ряды поглощения ТМ фитомассой пилезии многоцветковой не совпадают, однако Co зелёный мох поглощает в наименьшей степени при исследовании в трёх изученных урбоэкосистемах [14].

Заключение. Эпифитные зелёные мхи можно рекомендовать для проведения экспериментов по выявлению их аккумулятивных возможностей по отношению к трансграничным загрязнителям и определению биоиндикаторов для использования в организации экоаналитического мониторинга, а также как средство в инженерно-

экологических изысканиях для представления информации в ЗВОС при выполнении работ по ОВОС.

Высокие валовые концентрации небиогенных ТМ в гаметофитах мхов косвенно указывают на существование антропогенных источников загрязнения воздуха г. Орла. Для городов Орла и Брянска подтверждено отсутствие видовой приуроченности к накоплению ТМ. Валовая концентрация биогенных и небиогенных ТМ в образцах гаметофитов эпифитных видов превышает фоновые значения для пяти поллютантов. Небиогенные ТМ – As, Ni, Ti, V, Cr, Pb – не аккумулируются пилезией многоцветковой и ортотрихумом туполистным. Дальнейшие биомониторинговые исследования состояния экосистем и компонентов сред обитания г. Орла должны проводиться в направлении поиска бриоиндикаторов, установления концентрации подвижных форм трансграничных поллютантов, исследования на предмет чувствительности к загрязнителям эпигейных, эпилитных и эпиксильных видов мохообразных.

Список литературы

1. Анищенко Л.Н. Бриоиндикация общего состояния атмосферы городской экосистемы (на примере г. Брянска) // Экология. - 2009. - № 4. – С. 264-270.
2. Анищенко Л.Н., Шапурко В.Н., Сафранкова Е.А. Особенности аккумуляции тяжелых металлов растениями и лишайниками в условиях сочетанной антропогенной нагрузки // Фундаментальные исследования. - 2014. - № 9-7. – С. 1527-1531.
3. Анищенко Л.Н. Опыт химической бриоиндикации состояния воздуха крупной урбоэкосистемы (на примере г. Брянска) // Бюллетень Брянского отделения РБО. - 2015. - № 1 (5). – С. 64-70.
4. Вардуни Т.В. Анализ содержания тяжёлых металлов в пилезии многоцветковой (*Pyralisia polyantha*), произрастающей в г. Ростов-на-Дону / Т.В. Вардуни, Т.М. Минкина, С.Н. Горбов, С.С. Манджиева // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – № 2. – С. 1-14.
5. Игнатов М.С., Афолина О.М., Игнатова Е.А. Список мхов Восточной Европы и Северной Азии // *Arctoa*. - 2006. - Т. 15. – С. 1-130.
6. Красногорская Н.Н., Баишева Э.З., Вдовина И.В. Мониторинг содержания тяжелых металлов в атмосфере г. Уфы с использованием листостебельных мхов // Безопасность жизнедеятельности. - 2007. - № 9. – С. 32-36.
7. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В.А. Ипатьев, В.Ф. Багинский, И.М. Булавик и др.; под ред. В.А. Ипатьева. – Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 1999. – 396 с.

8. Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошкообразных пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. М 049-П/04. – СПб.: ООО НПО «Спектрон», 2004. – 20 с.
9. Рогова Н.С., Рыжакова Н.К., Борисенко А.Л., Меркулов В.Г. Изучение аккумуляционных свойств мхов, используемых при мониторинге загрязнения атмосферы // Оптика атмосферы и океана. - 2011. - 24. - № 1. – С. 79–83.
10. Руководство ЕМЕП по отбору проб и химическому анализу / пер. с англ.; под ред. А.Г. Рябошапко. Kjeller, 2001 [site of NILU]. - URL: <http://tarantula.nilu.no/projects/ccc/manual/index.html> (дата обращения: 22.08.2017).
11. Серебрякова Н.Н. Эколого-биологические особенности листостебельных мхов и использование их в экологическом мониторинге: на примере Пензенской области: дис. ... канд. биол. наук. – Саратов, 2009. – 132 с.
12. Folkesson L. Interspecies calibration of heavy metal concentration in nine mosses and lichens: applicability to deposition measurement // Water Air Soil Poll. - 1979. - № 11. – P. 253.
13. Harmens H. et al. Monitoring of atmospheric deposition of heavy metals, nitrogen and POPs in Europe using Bryophytes. Monitoring Manual. – Bangor: ICP Vegetation Coordination Centre, 2010. – 9 p.
14. Komisar O.S., Boyko M.F. Heavy metals in gametophytes of moss *Bryum caespiticium* Hedw. in parks and on Lenina Avenue in Mykolayiv city (Ukraine) // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. - 2015. - III (5). – Is. 41. – P. 7-10.
15. Winfried S. Metal accumulation in mosses across national boundaries // Uncovering and ranking causes of spatial variation Environmental Pollution. - 2008. - 151. – P. 377-388.