

УДК 581.5:574.2(574.3:574.4)

Экологические аспекты фиторемедиации и рекультивации с использованием сосудистых растений и мохообразных

© 2014. Л. Н. Анищенко¹, д.с.-х.н., профессор, И. А. Балясников², к.с.-х.н., директор,
Т. А. Рудакова, зав. лабораторией,

¹Брянский государственный университет им. акад. И. Г. Петровского,

²Региональный центр государственного экологического контроля
и мониторинга по Брянской области,

e-mail: eco_egf@mail.ru, rcgekim32@gmail.com

Представлены данные по использованию наземных и водных сосудистых растений и компонентов живого напочвенного покрова лесов мохообразных в биоремедиации биотопов от элементов группы тяжёлых металлов (на примере Брянской области). Компоненты биотопов лесных и водных экосистем химически опасного техногенного объекта – предприятия по утилизации химического оружия в Брянской области (ОУХО) – после завершения технологического цикла будут нуждаться в рекультивации. Результат эколого-флористических и экоаналитических работ – перечень видов и фитоценозов для организации фиторемедиации экосистем. Основные требования к таким объектам – широкое распространение, хорошее накопление биомассы и интенсивное вегетативное размножение. Установлено, что виды мохового покрова лесных экосистем накапливают тяжёлые металлы (ТМ) неодинаково: более всего – Fe, Pb, Zn, Mn. Мохообразные рекомендованы для мониторинга района ОУХО по отношению к Sr, Pb, Zn, Cu, Fe, Mn. Среди водных растений-макрофитов наибольшая накопительная способность регистрируется у экологической группы укореняющихся в грунте растений и выносящих листья на поверхность. Среди синантропных сообществ хорошо аккумулируют ТМ моновидовые ценозы. Таким образом, выделены перспективные виды для применения в восстановлении водных ценозов – *Nuphar lutea*, *Ceratophyllum demersum*, *Potamogeton natans*, *Spirodela polyrrhiza*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, лесных экосистем – *Sphagnum squarrosum*, среды на селитебных территориях – синантропные сообщества *Urtica dioica* и *Cyclachaena xanthiifolia*.

In article data on use of land and water vascular plants and components live land cover of woods moss in bioremediation from elements of group of heavy metals (on an example of Bryansk area) are presented. Components of forest habitats and aquatic ecosystems chemically hazardous man-made object – installations for the disposal of chemical weapons in the Bryansk region (OUXO) – after completion will require remediation. The result of ecological- floristic and environmental analysis work – list of species and plant communities to organize phytoremediation ecosystems. The basic requirements for such facilities is widespread, good biomass accumulation and intensive vegetative reproduction. It is established that the species of the moss cover of forest ecosystems accumulate heavy metals varies: most – Fe, Pb, Zn, Mn. Bryophytes are recommended for monitoring district of ocwd with respect to Sr, Pb, Zn, Cu, Fe, Mn. Among aquatic plants (macrophytes) largest storage capacity shall be registered with the environmental group is taking root in the soil of plants and delivering the sheets to the surface. Among synanthropic communities well accumulate heavy metals monomedia communities. Perspective species for application in restoration water ecosystem – *Nuphar lutea*, *Ceratophyllum demersum*, *Potamogeton natans*, *Spirodela polyrrhiza*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, wood ecosystem – *Sphagnum squarrosum*, environments on inhabited territories – synanthropic communities *Urtica dioica* and *Cyclachaena xanthiifolia*.

Ключевые слова: фиторемедиация, химически опасные техногенные объекты, сосудистые растения, мохообразные, Брянская область.

Keywords: phytoremediation, chemically hazardous industrial objects, vascular plants, moss, Bryansk region.

Фиторемедиация компонентов наземных и водных экосистем – перспективное направление прикладных экологических исследований, включающее оценку хронического воздействия неблагоприятных факторов, диагностику последствий длительного воздействия загрязнителей (в том числе и сочетанной природы), суммарного эффекта комплекса неблагоприятных факторов (биобезопасности), разработку мероприятий по биологической

реабилитации территорий [1–4]. Однако в настоящее время практически отсутствуют работы, рассматривающие моховой покров, а также широко распространённые фитоценозы синантропной, водной и прибрежно-водной растительности как средство фиторемедиации и последующей рекультивации при различных типах загрязнения, за исключением единичных работ [5, 6]. Компоненты живого напочвенного покрова лесных экосистем,

а также рудеральные, сеgetальные и другие синантропные ценозы, макрофитная растительность обладают свойством быстро восстанавливаться при нарушении (или изъятии). Это обстоятельство позволит ускорить процессы репарации экосистем при стрессовых воздействиях.

На территории Брянской области (юго-западное Нечерноземье России) расположено около 20 опасных техногенных объектов, в том числе и первого класса опасности: объект по хранению (ОХХО) и объект по утилизации химического оружия (ОУХО, 1204) в Почепском районе Брянской области. Все химически опасные техногенные объекты (в том числе и особо опасные – по хранению и утилизации химического оружия) требуют организации комплексного экологического мониторинга для целей обеспечения безопасности, впоследствии – разработки ремедиационных мероприятий в районе эксплуатации объекта. Поэтому поиск надёжных фиторемедиаторов – основа проведения завершающего этапа работ по эксплуатации техногенных систем повышенной опасности.

Цель статьи – рассмотреть накопительные возможности мохообразных, компонентов фитобиоты наземных и водных сообществ по отношению к элементам группы ТМ для оптимизации биоремедиационных мероприятий.

Исследования проводились на селитебных территориях 17 административных районов Брянской области, также в районе ОУХО Почепского района Брянской области (реперные точки 2, 19, 27; 68, 74, 88), в водных объектах Красногорского (Миркинское водохранилище) и Климовского (р. Снов) района.

Сообщества синантропной растительности, а также макрофитной и прибрежно-водной подвергались геоботаническим описаниям по методике школы Ж. Браун-Бланке (1964) [7]. В полевых условиях с площади 0,25 м² скашивалась надземная биомасса растений, подвергалась общепринятой камеральной обработке для пробоподготовки к работе на спектрометре «Спектроскан-Макс» [8]. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве определялись по гигиеническим нормативам [9, 10]. В синантропных ценозах данные анализировались для смешанных образцов фитомассы, для мохообразных живого напочвенного покрова лесных экосистем и водной растительности – для отдельных видов. Номенклатура сосудистых растений дана по С. К. Черепанову [11].

Вычисляли коэффициент накопления (К_{нак}) как отношение концентрации ТМ в образцах фитомассы и концентрации ТМ в почве (грунте) прикорневого пространства. К_{нак} свидетельствует о степени аккумуляции элементов и их соединений исследуемым растением.

Накопительные возможности по отношению к 12 ТМ анализировались для образцов фитомассы в сообществах синантропной растительности класса *Artemisietea vulgaris*, *Bidentetea tripartitae*. Наибольшая аккумуляционная способность по отношению к стронцию зарегистрирована для сообществ ассоциации *Leonuro-Urticetum dioicae*, *Echinocystis lobata* (116,32 и 119,73 мг/кг), к железу – сообществ *Artemisia vulgaris*, *Helianthus tuberosus*, *Cyclachaena xanthiifolia*, *Bidens tripartite* (12506,14 и 12933,95 мг/кг), к хрому – сообществ *Urtica dioica*, *Cyclachaena xanthiifolia* (68,21 и 72,17 мг/кг), к титану – сообществ *Helianthus tuberosus*, *Cyclachaena xanthiifolia* (222,24 и 295,01 мг/кг).

В незначительных количествах надземной растительной биомассой поглощаются кобальт и ванадий. Наиболее перспективны в отношении накопления ТМ, поступающих в почву из различных источников, – широко распространённые синантропные сообщества *Urtica dioica*, а также неафитные фитоценозы *Cyclachaena xanthiifolia*.

Виды мохового покрова лесных экосистем накапливают ТМ неодинаково. Менее всего происходит адсорбция кобальта и ванадия; более всего – Fe, Pb, Zn, Mn. Повышенная концентрация биогенов – Fe, Zn и Mn объясняется тем, что эти ионы входят в состав кофакторов и диагностируются в любых живых компонентах ценозов. Ионы Pb, как ксенобиотики, активно включаются в биологические циклы малого круговорота и наиболее интенсивно накапливаются в живом веществе – бриофитах.

Таким образом, для отдельных видов и смешанных проб мохообразных установлены различные аккумулятивные возможности по отношению к ТМ на основе К_{нак} (рис. 1–4).

Так, *Atrichum undulatum* хорошо аккумулирует Cr, Zn, Mn, *Sphagnum squarrosum* – Pb, Zn, Ni, Cr, Sr, *Polytrichum commune* – Zn, Cr. С удалением от ОУХО для *Atrichum undulatum* возрастает аккумуляция Zn, Cr, падает – для Mn; для *Sphagnum squarrosum* – возрастает аккумуляция Sr, Zn, Cr, Fe, Mn, Cr, Cu, убывает – для Pb; для *Polytrichum commune* возрастает аккумуляция Zn, Fe, Cr, убывает – для Mn.

Наиболее перспективный вид для фиторемедиации при рекультивации лесных

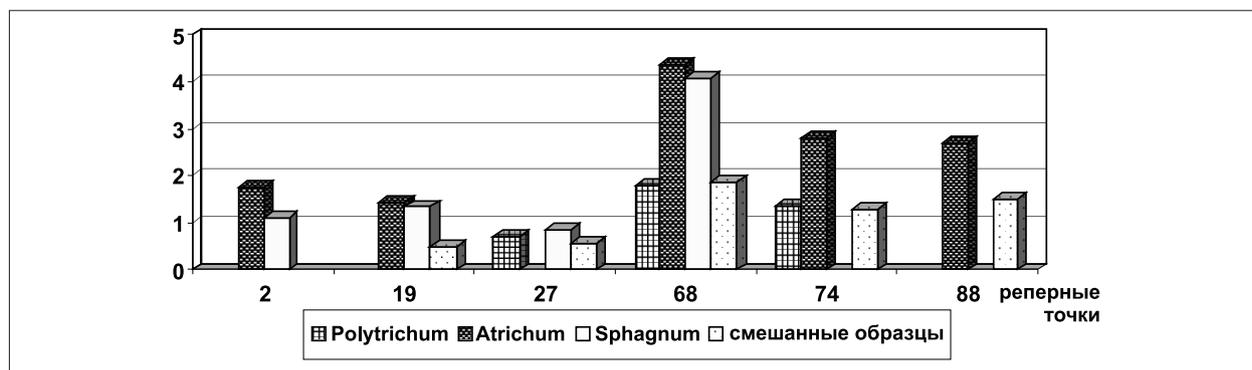


Рис. 1. Коэффициенты накопления для цинка в одних и тех же реперных точках для отдельных видов и смешанных образцов мохообразных.

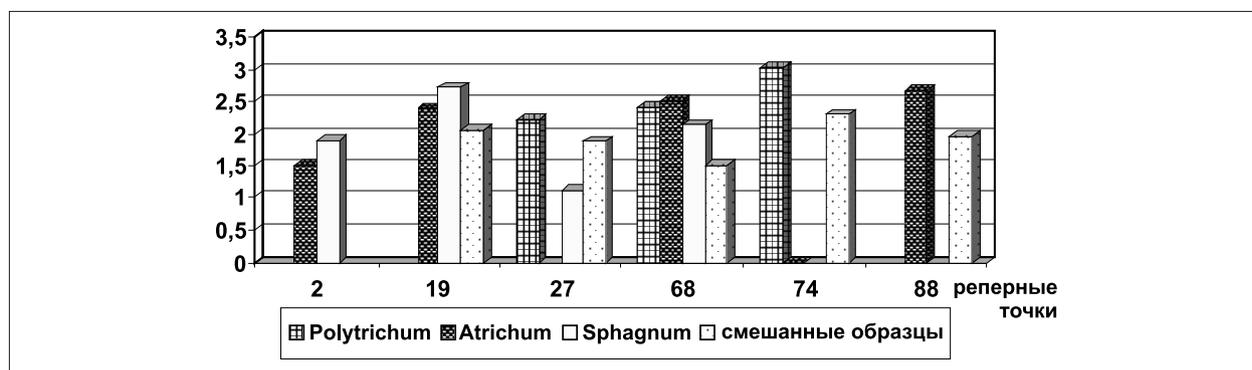


Рис. 2. Коэффициенты накопления для хрома в одних и тех же реперных точках для отдельных видов и смешанных образцов мохообразных.

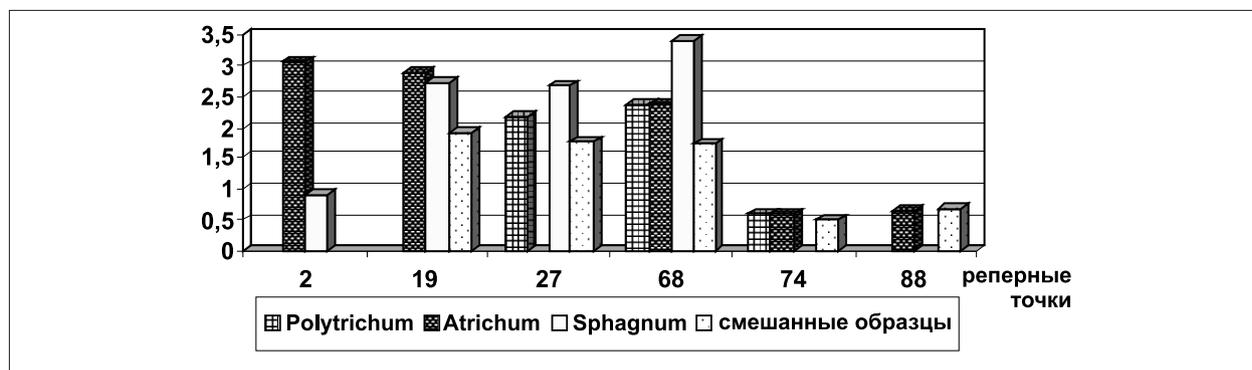


Рис. 3. Коэффициенты накопления для марганца в одних и тех же реперных точках для отдельных видов и смешанных образцов мохообразных.

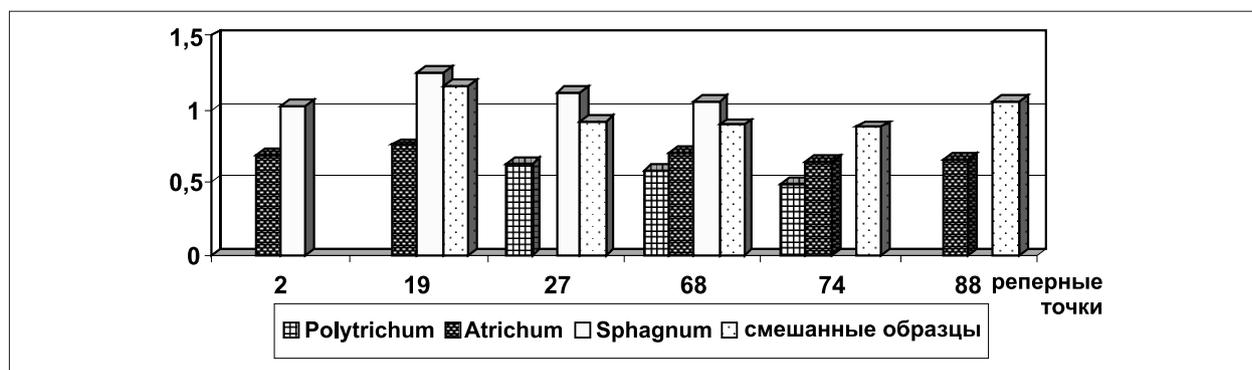


Рис. 4. Коэффициенты накопления для свинца в одних и тех же реперных точках для отдельных видов и смешанных образцов мохообразных.

экосистем – *Sphagnum squarrosum*. Также рекомендуем мохообразные для мониторинга района ОУХО по отношению к Sr, Pb, Zn, Cu, Fe, Mn и использованию для фиторемедиации почв при возможных значительных загрязнениях ТМ. Однако, несмотря на значительное накопление ТМ в моховом покрове, вклад этого компонента в общее загрязнение лесного ценоза токсикантами невелик. Это связано с небольшими по сравнению с другими растительными ярусами запасами фитомассы мохового покрова в исследуемых экосистемах.

При анализе данных о валовом содержании ТМ в растительной биомассе в р. Снов выяснено следующее. Превышает ОДК концентрация свинца в побеговой массе *Phragmites australis*, для остальных растений содержание свинца находится в пределах ОДК. Валовая концентрация меди выше ОДК в пробах биомассы *Acorus calamus* (корневища и надземная биомасса), цинка – в биомассе *Scirpus lacustris*. Не зарегистрировано содержание меди в биомассе плейстофита *Spirodela polyrrhiza*, прибрежно-водного вида *Sparganium emersum*. ОДК для марганца превышена в пробах гелофитов: *Scolochloa festucacea*, *Sparganium emersum*, *Agrostis stolonifera*, *Scirpus lacustris*, плейстофита – *Spirodela polyrrhiza* (валовое содержание марганца максимальное: от 16381,0 до 15283,0 мг/кг). Содержание кобальта в образцах фитомассы водных растений ниже предела обнаружения прибора. Титан зарегистрирован только в корневищах *Acorus calamus*. Наибольшая валовая концентрация стронция показана для плейстофитного вида – *Spirodela polyrrhiza* – от 318,9 до 210,0 мг/кг (различия видовых концентраций статистически достоверны $t_{\text{практ}} > t_{\text{табл}}$). Наименьшее содержание стронция имеет биомасса *Sparganium emersum*. Наибольшее содержание железа зарегистрировано в корневищах *Acorus calamus*, надводной биомассе *Agrostis stolonifera* и *Scirpus lacustris*. Высока валовая концентрация хрома для проб *Agrostis stolonifera* (88,0 мг/кг) и *Scirpus lacustris* (71,0 мг/кг).

Для проб *Ceratophyllum demersum*, отобранных в различных географических точках русла р. Снов, валовые концентрации ТМ мало различаются (статистически недостоверные различия). В целом накопительная способность по отношению к ТМ у речных видов различных экологических групп достоверно различается ($t_{\text{практ}} > t_{\text{табл}}$) по отношению к стронцию, меди, железу, марганцу и хрому.

Для проб фитомассы растений с территории водохранилища значения валового

содержания ТМ распределяются следующим образом. Превышена ОДК по свинцу в биомассе: *Phragmites australis*, *Nuphar lutea* (надводная биомасса, корневище), *Typha latifolia* (корневище), *Spirodela polyrrhiza*. Выше ОДК валовая концентрация цинка обнаружена в пробах *Phragmites australis* (надводная биомасса, корневище), *Nuphar lutea* (корневище), *Typha latifolia* (надводные побеги, корневище), *Potamogeton natans*, *Stratiotes aloides*. Высокое содержание меди зарегистрировано в надводной биомассе и корневищах *Phragmites australis*. Образцы биомассы *Potamogeton perfoliatus* и *Ceratophyllum demersum*, *Spirodela polyrrhiza* и *Hydrocharis morsus-ranae*, *Stratiotes aloides* меди не содержат. Превышает ОДК валовая концентрация марганца для проб *Phragmites australis* (корневище), *Typha latifolia* (надводные побеги, корневище), *Potamogeton perfoliatus*, *Ceratophyllum demersum*, *Spirodela polyrrhiza*, *Hydrocharis morsus-ranae*, *Nuphar lutea* (побеги и корневище), *Potamogeton natans*. Содержание никеля во всех пробах зарегистрировано в пределах ОДК. Для биомассы *Spirodela polyrrhiza*, отобранной в разных точках водохранилища, различия в валовом содержании всех ТМ статистически недостоверны.

Наибольшая валовая концентрация общего стронция определена в биомассе *Stratiotes aloides*, *Potamogeton perfoliatus*, *Spirodela polyrrhiza*, наименьшая – *Typha latifolia* (надводные побеги), *Nuphar lutea* (побеги и корневище). Валовое содержание железа велико в биомассе проб *Potamogeton natans*, *Typha latifolia* (надводные побеги, корневище), *Phragmites australis* (корневище). Также обнаружен ванадий и титан в корневищах *Typha latifolia*. Ни в одном из образцов растений кобальт не обнаружен. В целом при анализе значений валового содержания ТМ в пробах видов с территории водохранилища выяснено, что статистически значимо ($t_{\text{практ}} > t_{\text{табл}}$) различается содержание стронция для плейстофитов *Spirodela polyrrhiza*, *Stratiotes aloides*, погруженного гидрофита *Potamogeton perfoliatus*, и остальных видов (и экологических групп). Значения наибольшей и наименьшей валовой концентрации свинца, цинка, меди, марганца также достоверно различаются для видов. Биомасса многокоренника в озере и реке также содержит различные валовые концентрации свинца (больше в озерных пробах). Остальные ТМ по значениям валового содержания отличаются статистически недостоверно.

Анализ содержания ТМ в биомассе растений эталонных водных экосистем (биосферный резерват Неруссо-Деснянское Полесье) показал следующее [12–14]. Концентрация общего стронция, никеля, хрома, особенно железа и марганца в образцах водных макрофитов Неруссо-Деснянского Полесья статистически достоверно ниже, чем в образцах речных и озёрных видов исследованной территории. Концентрация меди, ванадия у водных макрофитов эталонных экосистем превышает по значениям их содержание в биомассе водных растений исследованной территории (статистически значимые различия).

Сравнительная характеристика валового содержания ТМ в биомассе водных растений водоёмов и водотоков в черте г. Брянска (значительное антропогенное сочетанное загрязнение вод) и проб исследованной территории выявила следующие различия [15]. В побеговой биомассе *Nuphar lutea* в черте города достоверно выше содержание цинка, меди, ванадия, ниже – железа, марганца, хрома; в биомассе *Ceratophyllum demersum* выше концентрация свинца, цинка, никеля, кобальта, ванадия, а железа, марганца, хрома – ниже; в биомассе *Stratiotes aloides* выше содержание свинца, цинка, меди, ванадия, ниже – стронция, железа, марганца; биомасса *Potamogeton natans* содержит значительные концентрации цинка, меди, ванадия по сравнению с пробами растений исследуемых водных объектов, низкие – стронция, железа, марганца, хрома: в биомассе плейстофита *Spirodela polyrrhiza* значительно выше концентрация свинца, цинка, меди, ванадия, ниже – стронция, железа, марганца.

Итак, для фиторемедиации водоёмов и водотоков при антропогенном загрязнении ТМ можно рекомендовать перспективные виды, которые быстро накапливают биомассу и размножаются вегетативно: *Nuphar lutea*, *Ceratophyllum demersum*, *Potamogeton natans*, *Spirodela polyrrhiza*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis*.

Таким образом, для центрального района Нечерноземной зоны России – Брянской области – получены данные о видах сосудистых растений и мохообразных, перспективных для фиторемедиации и рекультивации экосистем при загрязнении ТМ. Рекомендуемые для биоремедиационных мероприятий виды широко распространены, встречаются в большом числе наземных и водных экосистем, прекрасно накапливают биомассу и обладают

поглонительными способностями к элементам антропогенного загрязнения.

Литература

1. Анищенко Л.Н., Буховец Т.Н. Настоящие водные макрофиты как аккумуляторы элементов // Экологическая безопасность региона: Статьи II Международной научно-практической конференции. Брянск, 22–24 октября 2009 г. Брянск. 2009. С. 38–42.
2. Анищенко Л.Н., Шматова Л.М. Фиторемедиация – перспективное направление восстановления биотопов нарушенных экосистем // Сотрудничество в области использования природных ресурсов и экологического оздоровления бассейна Днепра: Материалы Междунар. научн.-практич. конф. Гомель. 2011. С. 86–89.
3. Фокина А.И., Домрачева Л.И., Широких И.Г., Кондакова Л.В., Огородникова С.Ю. Микробная детоксикация тяжёлых металлов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 1. С. 4–10.
4. Маракулина С.Ю., Дёгтева С.В. Изменение экологических условий, растительности и почв при восстановительных сукцессиях на суходольных лугах Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 64–73.
5. Шматова Л.М. Накопительная способность мохового покрова в условиях естественных и техногенных экосистем // Экологическая безопасность региона: Статьи междунар. науч.-практич. конф. Брянск, 29–30 октября 2009 г. Брянск. 2008. С. 404–409.
6. Рафикова Г.Ф. Сравнительная характеристика микобиот почв разных типов при загрязнении нефтью и биорекультивации: Автореф. дисс...канд. биол. наук. Уфа. 2009. 24 с.
7. Braun-Blanquet J. Pflanzensociologie. J. 3. Aufl. Wien, N.-Y., 1964. 865 S.
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. ГН 2.1.7.2041-06 Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.
10. ГН 2.1.2042-06. Гигиенические нормативы. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве.
11. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб. 1995. 992 с.
12. Анищенко Л.Н. Динамика содержания тяжёлых металлов в биомассе макрофитов водоёмов и водотоков Неруссо-Деснянского Полесья // Экологическая безопасность региона: Статьи III Международной научно-практической конференции. Брянск, 21–22 октября 2010 г. Брянск. 2010. С. 48–55.
13. Анищенко Л.Н. Водная растительность и её продукция в экотопах фоновых территорий Брянского Полесья // Российско-Украинско-Белорусское пограничье:

25-летие экологических и социально-педагогических проблем в постчернобыльский период: Материалы междунар. научн.-практ. конф. Новозыбков, 26–27 апреля 2011 г. Новозыбков. 2011. С. 90–93.

14. Итоги биологического контроля качества окружающей среды в системе регионального экомониторинга

(монография) / Ред. Л.Н. Анищенко. Брянск: Изд-во «Курсив», 2011. С. 52–81.

15. Анищенко Л.Н., Буховец Т.Н. Флора и растительность настоящих водных макрофитов водоёмов и водотоков Южного Нечерноземья России. Брянск: Изд-во «Курсив», 2009. 200 с.

ФГБОУ ВПО «Вятский государственный гуманитарный университет»

ФГБУН Институт биологии Коми НЦ УрО РАН

22–24 апреля 2015 г.

**Всероссийская научно-практическая конференция
«Экология родного края: проблемы и пути их решения»**

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе Всероссийской научно-практической конференции «Экология родного края: проблемы и пути их решения», которая состоится в г. Кирове на базе Вятского государственного гуманитарного университета по адресу: г. Киров, ул. Ленина, 198.

Конференция будет включать в себя следующие мероприятия:

1. Пленарные и секционные доклады учёных по направлениям:
 - Мониторинг техногенного загрязнения;
 - Биомониторинг растительного и животного мира;
 - Структурные особенности растений и их сообществ как адаптации к условиям среды;
 - Адаптации животных и их сообществ к условиям среды;
 - Методология оценки состояния природных и антропогенно трансформированных экосистем;
 - Проблемы социальной экологии и экологического образования;
 - Биотехнологии в науке и промышленности.
2. Научный семинар «Механизмы устойчивости и адаптации биологических систем к природным и техногенным факторам».
3. Круглый стол «Структурные особенности растений и их сообществ как адаптации к условиям среды».

К участию приглашаются учёные, в том числе молодые учёные, также специалисты по профилю конференции.

**Для участия в конференции и размещения материалов в сборнике работ
до 15 марта 2015 г. обращаться в организационный комитет:**

ecolab2@gmail.com

г. Киров, ул. Ленина, 113, 4-й этаж,

тел. 8(8332) 37-02-77,

технический секретарь Кардакова Евгения Михайловна

ответственный секретарь Анна Сергеевна Олькова: morgan-abend@mail.ru