

## Животные и растения в экологической оценке территорий



**В работе автор показывает возможности и недостатки такого метода в составе экологических исследований, как биоиндикация. В частности, рассмотрены результаты, полученные в результате выполненных фитоиндикации и зооиндикации. Как отмечается, полученные результаты не могли быть получены при использовании традиционных методов экологической оценки.**

**Подлипский Иван Иванович**

Доцент кафедры Геологии и геоэкологии РГПУ им. А.И. Герцена, к.г.-м.н.

[primass@inbox.ru](mailto:primass@inbox.ru)

Биоиндикация (от греческого *bios* – жизнь и латинского *indicare* – указывать) – это использование хорошо заметных и доступных для наблюдения биологических объектов (или их характеристик) с целью определения компонентов менее легко наблюдаемых (например, различных воздействий или поллютантов). Первые (биологические объекты) называются индикаторами, вторые (факторы воздействия или различные загрязнители) – индикатами. Под биологическими объектами понимаются любые биологические системы на различных уровнях организации живой материи (молекулы органических веществ, клетки, ткани, органы, растительные и живые организмы, популяции, виды, сообщества

организмов), с включением при необходимости костных компонентов (биоценозы, почвогрунты и ландшафты в целом).

Использование живых индикаторов (растений и животных) в экологической оценке состояния территорий имеет следующие преимущества:

- животные и растения суммируют «данные» об окружающей среде и отражают ее состояние в целом;
- биоиндикация, как правило, менее дорогостояща и трудоемка, чем применение физических и химических методов;
- биоиндикация позволяет более точно оценить скорость происходящих в природной среде изменений и сделать качественный и количественный прогноз;
- использование живых организмов и растений в экологической оценке позволяет установить пути и направления миграции, а также места скопления в экологических системах различного рода веществ и элементов поллютантов и разработать рациональную систему экологического мониторинга.

Основой биоиндикации является теснейшая взаимосвязь и взаимообусловленность всех явлений живой и неживой природы. Глубокие связи между почвой, породой и растительностью изложены во многих трудах отечественных и иностранных специалистов [6, 8, 9, 10, 23 и др.]. Одним из первых примеров практического использования растений, как индикаторов почвенных условий, является работа Ф.И. Рупрехта 1866 года [24], на базе которой были разработаны основы нового биоиндикационного направления – индикационной геоботаники. Из теоретических и обобщающих трудов по биоиндикации первой наиболее фундаментальной была сводка Ф. Клементса [27], заложившая основу учения о растительных индикаторах.

Для определения и описания особенностей почвенных условий могут быть использованы и живые организмы. Так практическим направлением в оформившейся с середины XX в. науки почвенной зоологии стал зоологический метод диагностики почв (почвенная индикация). Этот подход основан на взаимосвязи и взаимообусловленности организмов и среды их обитания, представляющей собой не только место обитания, но и результат их совокупной деятельности. Основоположниками этого направления в России является академик М.С. Гиляров [4] и профессор В.Г. Мордкович [17-18].

Почти одновременно индикационное направление начало развиваться и в гидробиологии (гидробиологическая индикация), где в качестве индикаторов состояния и свойств вод начали использовать различные живые организмы (или их сообщества) и растения (фитоценозы в целом) [15, 16, 20, 26 и др.].

### **Методика проведения биоиндикационных исследований (изысканий)**

Процесс биоиндикации фактически представляет собой классификацию участков на основании определенных показателей (индикаторов) и последующего сравнения их метрических характеристик, которые изменяются некоторым предсказуемым образом с увеличением антропогенной нагрузки. Таким образом, в качестве индикаторов могут выступать различные показатели, характеризующие отдельные сообщества или организмы. Так, например, в рамках аккумулятивной биоиндикации основными показателями являются значения содержаний различных веществ и элементов в организмах.

Теоретической основой метода аккумулятивной биоиндикации являются идеи В.И. Вернадского о единстве жизни и геохимической среды, и о рассеянии содержаний

химических элементов. В качестве сорбирующих сред в настоящее время широко применяются почвенные компоненты – суглинистые почвы, лесная подстилка, почва, а в рамках АБ могут быть использованы части живого вещества – вегетативные и генеративные органы растений, мхи, грибы, лишайники, органы и системы органов животных, в соответствии с чем АБ разделяется на несколько видов: фитоиндикация (растения), зооиндикация (животные), бриоиндикация (мхи), лихеноиндикация (лишайники) и др.

### **Фитоиндикация**

Аккумулятивная биоиндикация является весьма перспективным методом для экологической оценки загрязнения окружающей среды различными веществами и элементами, в том числе и тяжелыми металлами. При этом нет принципиальной разницы в определении этим методом не только природных, но и техногенных химических веществ и элементов.

В целях иллюстрации возможностей применения аккумулятивной фитоиндикации в экологической оценке рассмотрим результаты работы по оценке состояния экосистемы санитарно-защитной зоны полигона твердых бытовых отходов (ТБО) и определению качества работы инженерно-защитных сооружений зоны складирования отходов (полигон «СпецАвтоТранс», Ленинградская область, Тосненский район, дер. Куньголово) [14].

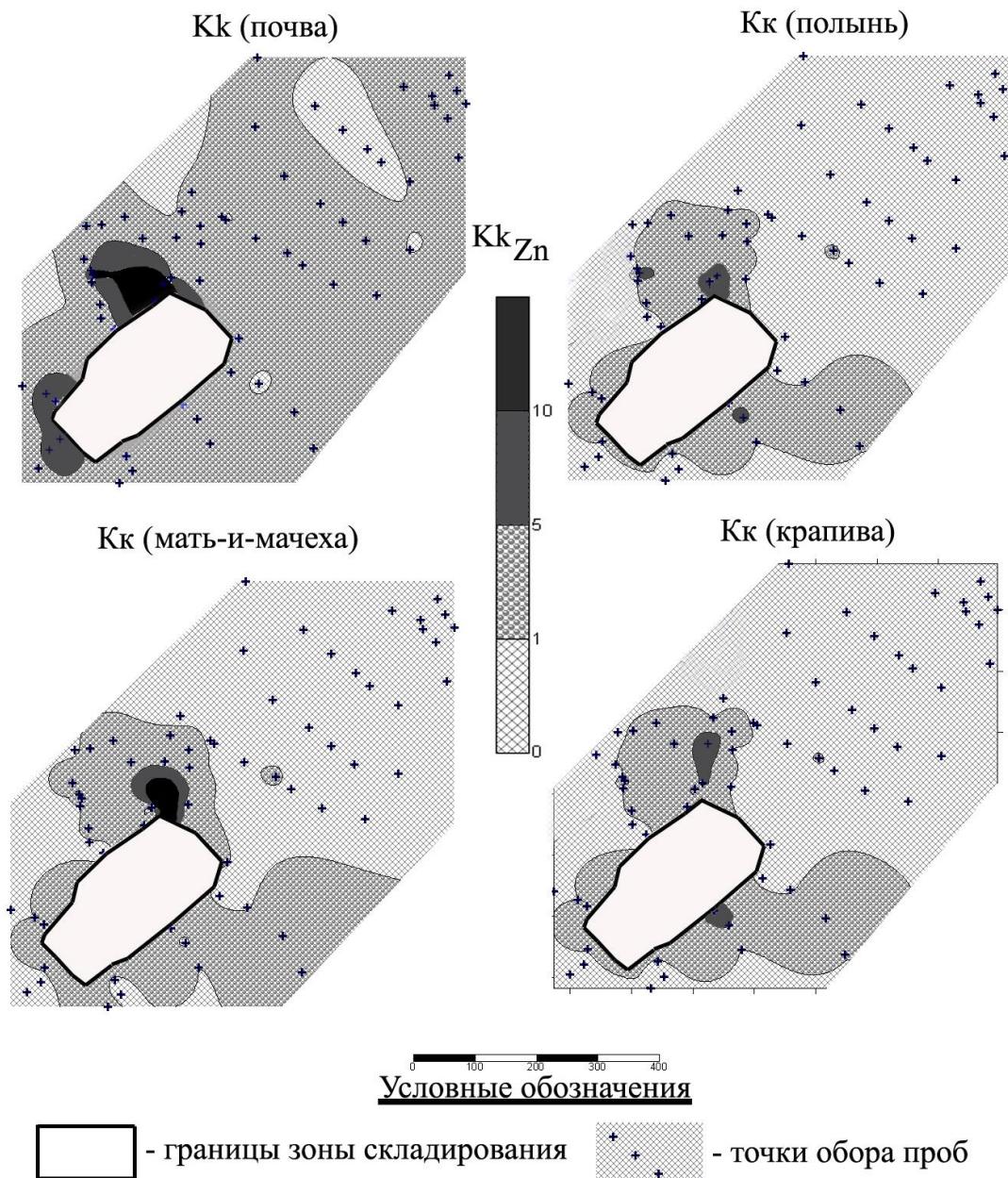
Биоиндикационные исследования на прилегающих к зоне складирования территориях базировались на исследовании биоаккумуляции тяжелых металлов в корнях и побегах произрастающих на них растений: мать-и-мачехи обыкновенной (*Tussilago farfara L.*); полыни горькой (*Artemisia absinthium L.*); полыни обыкновенной (*Artemisia vulgaris L.*); крапивы двудомной (*Urtica dioica L.*); крапивы жгучей (*Urtica urens L.*); пижмы обыкновенной (*Tanacetum vulgare L.*); иван-чая узколистного (*Chamerion angustifolium*); осота огородного (*Sonchus oleraceus*); горца птичьего (*Polygonum aviculare L.*).

Анализ этих растений на содержание загрязняющих тяжелых металлов выявил наличие прямой связи между повышенными уровнями концентраций Fe, Zn, Cu, Pb, Cr и Ni в грунтах, примыкающих к полигонам территорий, и уровнями соответствующих тяжелых металлов в произрастающих на них растениях, прежде всего, в их корнях. В подавляющем большинстве опробований содержание металлов в корнях растений снижалось в ряду Fe>Mn>Zn>Cu>Pb>Cr>Ni, что отвечало общим закономерностям количественного распределения тяжелых металлов в почвах. При этом по уровням аккумуляции в корнях Fe и Mn растения располагались в порядке крапива>полынь>матер-и-мачеха, а по Zn, Cu, Cr, Ni – в порядке полынь>крапива>матер-и-мачеха. Следует отметить, что на участке, сильно загрязненном свинцом (2549 мг/кг в почве), содержание Pb в корнях полыни составило 498, а у крапивы – 277 мг/кг сухой биомассы, что свидетельствует о высокой степени вовлечения этих растений в цикл Pb в окружающей среде.

Важным количественным критерием значимости растения как аккумулятивного биоиндикатора является величина коэффициента биологического накопления (КБН) металлов в системе почва/корень, который рассчитывали по формуле  $KBN = A/B$ , где  $A$  - содержание металла в биомассе корня (мг/кг),  $B$  - содержание металла в почве (мг/кг) [13]. Было показано, что на большей части обследованных территорий величины КБН металлов в корнях полыни, крапивы и матер-и-мачехи удерживались в относительно узких пределах, которые составили для Fe 0,2-0,5, Mn 0,1-0,4, Zn 0,4-0,9, Cu 0,3-0,8, Cr 0,6-2,6, Ni 0,6-1,6, Pb 0,4-1,2, что дает основание рассматривать эти растения как объекты, отвечающие целям аккумулятивной биоиндикации на загрязненных ТМ территориях.

Учитывая наличие прямой связи между количественным распределением содержания тяжелых металлов в почвах и корнях растений, была рассмотрена возможность применения биоиндикаторных показателей, установленных для корней растений, к оценке экологического состояния территорий в зоне воздействия свалочного тела полигонов ТБО. В качестве оценочного критерия были выбраны коэффициенты концентрации (Кк) 3-х металлов в корнях индикаторных растений (мать-и-мачеха, полынь, крапива) на обследованных территориях, рассчитанные относительно содержания этих металлов в корнях растений фоновых территорий (рис. 1).

Анализ характера распределения величин Кк свидетельствовал, что для почв обследованных территорий в целом они находились в пределах 1-5, за исключением нескольких зон повышенного локального загрязнения с показателями Кк 5-10 и выше 10. Величины Кк для растений оказались более ранжированными, причем области с величинами Кк 1-5 располагались ближе к телу полигона и имели форму пятен (рис. 1), вытянутость которых позволяла судить о доминирующих направлениях распространения потоков металлов. Поскольку степень аккумуляция металлов в растениях определяется их биодоступностью преимущественно в ионной форме, полученные данные позволяют полагать, что растения реагируют на свежие потоки ионов тяжелых металлов в среде. Таким образом, индикации с использованием показателя Кк в корнях растений представляется более информативным и имеющим определенные преимущества в рамках оценки воздействия полигонов ТБО на текущее экологическое состояние окружающей среды.



**Рис. 1** Схема распределения  $K_k(Zn)$  в почвах и растениях на полигоне Спецавтотранс (Тосненский район)

Полученные результаты в части расположения ореолов дают возможность выделить основные пути миграции загрязнений с территории зоны складирования, а также свидетельствуют о наличии разрывов в системе защитных сооружений полигона ТБО. Такие результаты не могли быть получены при использовании традиционных методов экологической оценки. В результате был разработан и реализован проект по восстановлению целостности системы инженерных защитных сооружений зоны складирования, а также разработан план проведения мониторинговых работ по оценке параметров самоочищения и самовосстановления экосистемы.

Кроме того, по итогам проведенных работ можно сделать вывод об изменении благоприятности условий жизни растений и существования экосистемы в целом. Это

сказывается на видовом многообразии и появлении в растительном сообществе сорных видов, что свидетельствует о разрушении экосистемы.

### Зоондикация

Согласно одному из основных законов экологии (правило десяти процентов или принцип Линдемана (*положение, согласно которому не более 10% энергии поступает от каждого предыдущего трофического уровня к последующему*) одним из основных факторов, определяющих накопление элементов в органах и тканях живых организмов, является их содержание в пище.

При рассмотрении цепи (сети) питания в природных, природно-техногенных и техногенных системах можно выделить несколько уровней потребителей готовых веществ - травоядных и хищников (консументов 1-3-го порядков) и соответственно несколько групп живых организмов, которые могут быть использованы в биоиндикационных исследованиях.

Наиболее подходящими для исследований являются фитофаги, которые могут быть представлены в экосистемах различными живыми организмами (черви, насекомые, земноводные, пресмыкающиеся, птицы, млекопитающие и др.). Основным источником пищи для таких организмов являются растения и продукты их жизнедеятельности. В связи с этим, используя фитофагов в качестве аккумулятивных биоиндикаторов, можно проследить и рассчитать параметры связи концентраций элементов и веществ (прежде всего, тяжелых металлов) в цепях: «порода (1) – почва (2) – растение (3) – фитофаг (4)». Проведение подобных исследований позволит оценить реальное экологическое состояние биогеоценоза в целом.

Критериями выбора живого организма для подобного рода биоиндикационных исследований должны быть: широкое повсеместное распространение, доступность и несложность методик сбора (отлова) организмов в количествах, достаточных для математической обработки. По выделенным параметрам наиболее хорошо подходят представители кольчатых червей (сем. *Lumbricina*) и почвенных жесткокрылых (сем. *Carabidae*, *Coleoptera*).

Возможности применения кольчатых червей (например, дождевого червя) в исследованиях распространения радиоактивных веществ (элементов), тяжелых металлов, металлоидов и других поллютантов подтверждены и обоснованы многими российскими и зарубежными учеными [11, 12 и др.].

Для иллюстрации возможностей применения аккумулятивной биоиндикации с целью экологической оценки территорий, рассмотрим результаты проведенного в 2013 г. комплексного опробования почв и живых организмов жилой зоны пос. Импилахти (Питкярантский р-н, респ. Карелия). Опробование проводилось по 4-м профилям, проходящим параллельно дорогам Т-образного перекрестка центральной части поселка. Расстояние между пикетами на профилях 50 м, точки опробования находились на удалении от края основания дорожной насыпи не менее 25 м. (т.е. в зоне потенциально наибольшего воздушного воздействия выхлопных газов автотранспорта) (рис. 2). Методы отбора и пробоподготовки почв использовались стандартные, согласно ГОСТ 17.4.4.02-84 «Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, микробиологического, гельминтологического анализа» [5]. В качестве биологического материала были использованы представители сем. *Lumbricina* (дождевые черви). Каждая проба составляла около 15-25 шт. взрослых особей. Собранных червей выдерживали до полной очистки пищеварительного тракта от частиц почвы в чистом тонкозернистом песке (известного

химического и минерального состава), после чего промывали дистиллированной водой, измельчали, высушивали и перемалывали до размерности 1-2,5 мм. Полученные навески анализировали с использованием портативного рентгено-флуоресцентного анализатора X-Spec (модель 50Н, производитель ЗАО «Научные приборы») на содержание Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg и Pb (мг/кг).

### Результаты проведенных исследований

По результатам анализа образцов почв были установлены более чем 2-х кратные превышения фоновых содержаний для таких элементов как Cu, Zn, As, Cd и Pb. По значению коэффициентов радиальной дифференциации [19] были установлены природные источники (материнские породы) аномалий Cr, Cu и Zn; для As, Cd и Pb на территории исследования имеет место их антропогенное происхождение. Значения суммарного показателя загрязнения [25], рассчитанные по  $K_k$  ( $\geq 1,5$ ) As, Cd, Pb, Zn и Cu находятся в пределах «допустимой» и «умеренно опасной» категории загрязнения.

С целью оценки показателей линейной зависимости содержания тяжелых металлов в почвах и тканях дождевых червей был проведен корреляционный анализ, позволивший установить достоверно высокие значения связи по содержанию Zn (0,83), Pb (0,88), As (0,91) и Cd (0,86). Высокие значения коэффициентов линейной корреляции говорят о «наследовании» геохимических особенностей грунтов живым веществом.



**Рис. 2** Схема проведения опробования в пос. Импиилахти (Питкярантский р-н, респ. Карелия), 2013 г.

По данным сопоставления кларковых (средних содержаний в живом веществе) и фоновых (установленных по данным [21]) значений содержаний элементов в живом веществе с средними, рассчитанными по всему объему данных, было установлено, что содержание Ca, Mn и Fe – находятся в пределах кларков [1, 2]; Cr, Co, Hg и Pb – в пределах фоновых содержаний; Cu, Zn, As и Cd – достоверно превышают естественные концентрации.

Для выделения групп химических элементов (ассоциаций), имеющих сходные закономерности распространения в компонентах окружающей среды (в данном случае в почвах и тканях дождевых червей), был использован комплекс методов многомерного статистического анализа и, в частности, факторный и кластерный анализ.

В результате проведенного анализа установлено наличие на территории исследования окислительного щелочного геохимического барьера, в области которого происходит накопление Cd, Hg и Co (область, связанная с точками 3.1-3.2 и 4.1.-4.2 на рис. 2), что отражается на составе тканей дождевых червей. Вторую группу (Pb, As, Cu и Cr) составляют элементы, которые замедляют свою миграцию в области наличия восстановительного щелочного геохимического барьера в грунте, расположенного в восточной части исследуемой территории (рис. 2, точки 2.1-2.6 и 1.1-1.6). Объединение в одну группу Zn и Mn также может свидетельствовать, наряду с результатом расчета коэффициентов радиальной миграции, о природных причинах образования геохимической аномалии Zn на территории исследования.

С целью эколого-геологического анализа полученных данных был произведен расчет коэффициентов концентрации по отношению к фоновым значениям, полученным по результатам работ 2012 года, проведенной на территории со сходным геологическим строением и невысокой техногенной нагрузкой [21]. Кроме того, полученные расчетным методом фоновые уровни, были сопоставлены с литературными данными по содержанию элементов в тканях дождевых червей [3, 11, 22], в результате чего были установлены условные нормы содержания исследуемых элементов в органах и тканях почвенной мезофауны.

Можно составить ряд элементов по возрастанию средних значений содержания в тканях дождевых червей, коэффициентов концентрации (по отношению к расчетному фону) (для значений <1) Cd>Cu>As>Zn. Кроме того, было установлено, что наиболее высокими значениями показателя контрастности зоохимической аномалии обладают Cu, Zn и Cd, что позволяет говорить о наличии постоянного их притока в систему в различных, в том числе и биодоступных формах.

В результате проведенного исследования и на основании коэффициентов корреляции в системе «горная порода – живое вещество» можно сделать заключение, что по Кк элементов в биологическом материале было подтверждено наличие геохимических аномалий Zn, Cu, As и Cd природного и/или антропогенного происхождения. Кроме того, было установлено наличие в грунте аномалии Pb, но, в связи с отсутствием сходных результатов в опробовании живого вещества, можно сделать заключение о малодоступности (и, следственно, низкой токсичности) свинца для живых организмов и растений на территории исследования.

Таким образом использованная в работе комплексная съемка совместно со статистическими методами анализа позволила однозначно определить состав полиэлементной аномалии, биодоступность для представителей почвенной мезофауны и установить источник происхождения (природный и/или техногенный) каждого из компонентов (элементов).

Несмотря на то, что биоиндикация позволяет дать интегральную оценку воздействия всего комплекса факторов на живые организмы, использование кольчатых червей для биоиндикации состояния окружающей среды в настоящее время является недостаточно разработанным направлением. Вероятно, биоиндикационные исследования, обладающие прогностической ценностью и позволяющие более или менее адекватно оценивать степень антропогенного воздействия на экосистемы, пока являются лишь теоретически проработанными и обоснованными и могут быть проведены на популяционном и экосистемном уровнях.

### Список литературы

1. Алексеенко В.А. Химические элементы в биосфере. Краснодар: Изд-во КГТУ, 1997, 98 с.;
2. Барабанов В.Ф. Геохимия. Л.: «Недра», 1985, 423 с.;
3. Бутовский Р.О. Устойчивость комплексов почвообитающих членистоногих к антропогенным воздействиям. М.: «День серебра», 2001, 322 с.;
4. Гиляров М.С. Зоологический метод диагностики почв. М.: «Наука», 1965, 275 с.;
5. ГОСТ 17.4.4.02-84 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Издательство стандартов, 1985 г.
6. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: «Мысль», 1983, 272 с.;
7. Добровольский В.В. Основы биогеохимии: Учебник для студентов высших педагогических учебных заведений. М.: Издательский центр «Academia», 2003, 400 с.;
8. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: «Наука», 1991, 151 с.;
9. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: «Мир», 1989, 439 с.;
10. Костычев П. А. Избранные труды. / П. А. Костычев; Под ред. И. В. Тюрина. М., 1951.- 667 с.;
11. Криволуцкий Д.А. Почвенная фауна в экологическом контроле. М., «Наука», 1994, 268 с.
12. Криволуцкий Д.А., Гиляров М.С. Жизнь в почве. М., «Молодая гвардия», 1985, 240 с.;
13. Куриленко В.В., Осмоловская Н.Г. и др. Основы экогеологии, биоиндикации и биотестирования водных экосистем/ Под ред. В.В. Куриленко. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 448 с.;
14. Куриленко В.В., Подлипский И.И., Осмоловская Н.Г. Эколого-геологическая и биогеохимическая оценка воздействия полигонов бытовых отходов на состояние окружающей среды // Экология и промышленность России. М.: Изд-во ЗАО «Калвис», №11 2012, с. 28-32;
15. Макрушин А.В. Биологический анализ качества вод. М.: Изд-во Зоол. ин-т АН СССР. 1974. 60 с.;
16. Методика проведения технологического контроля работы очистных сооружений городской канализации. - М.: «Стройиздат», 1977, 303 с.;

17. Мордкович В.Г. Зоологическая диагностика почв лесостепной и степной зон Сибири. Новосибирск: «Наука», 1977, 110 с.;
18. Мордкович В.Г., Шатохина Н.Г., Титлянова А.А. Степные катены. Новосибирск: «Наука», Сибирское отделение, 1985, с. 22-30;
19. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Изд-во МГУ, 2013, 168 с.;
20. Муравьев А.Г. Оценка экологического состояния природно-антропогенного комплекса: Учебно-методическое пособие. СПб.: «Крисмас+», 1997, 118 с.;
21. Подлипский И.И. Аккумулятивная биоиндикация (на примере, сем. Lumbricina) в эколого-геологической оценке состояния почво-грунтов. / Материалы XIV межвузовской молодежной научной конференции «Школа экологической геологии и рационального недропользования». СПб.: Изд-во СПбГУ, 2014, с. 63-69;
22. Покаржевский А.Д. Геохимическая экология наземных животных. М.: «Наука», 1985, 302 с.;
23. Ревич Б.А. Загрязнение окружающей среды и здоровье населения. Введение в экологическую эпидемиологию. Учебное пособие. М.: «Academia», 2001, 264 с.;
24. Рупrecht Ф.И. Геоботанические исследования о чернозёме, с картой распространения чернозёма в Европейской России / Прил. к 10-му тому Зап. Акад. наук, №6. СПб.: Тип. Акад. наук, 1866;
25. Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: «Недра», 1990, 335 с.;
26. Шуйский В.Ф. Основы общей биологии и общей экологии: учеб. пособие / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 2001, 63 с.;
27. Clements F.E. Plant indicators: the relation of plant communities to process and practice. Washington, 1920. 388 p.;