

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК.504.064

ЗООИНДИКАЦИЯ В ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2016 г. И. И. Подлипский

Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7/9, Санкт-Петербург, 19900 Россия. E-mail: primass@inbox.ru

Поступила в редакцию 25.10.2014 г.

После исправления 14.01.2015 г.

Изучение почвенной мезофауны в эколого-геологических исследованиях загрязнений селитебных территорий тяжелыми металлами и металлоидами позволили однозначно определить состав поли-элементных аномалий, их биодоступность и установить источник происхождения (природный и/или техногенный) каждого из компонентов (элементов).

Ключевые слова: зооиндикация, почвенная мезофауна, тяжелые металлы, селитебная зона.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках эколого-геологических исследований широкой областью применения обладает комплекс методов аккумулятивной биоиндикации (АБ), основывающийся на определении химического состава биосред – сорбентов и/или аккумуляторов поллютантов из окружающей среды.

Теоретическая основа методов биоиндикации – идеи В.И. Вернадского о единстве жизни и геохимической среды и рассеянии химических элементов. Как сорбирующие среды в настоящее время широко исследуются косные компоненты – снеговой покров, лесная подстилка, почвогрунт, 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, зооиндикация, бриоиндикация, лишеноиндикация и др.

Пробы биологического материала, в отличие от литохимических, обладают большей репрезентативной емкостью, т.е. могут быть экстраполированы на большую площадь [20]. Так, например, проба грунта (почвы), отобранная до глубины 20 см, методом “конверта” с площадки 5×5 м, представительна для площади 25 м² и объема грунта 5 м³ (детальный мониторинг). Пробы органов и тканей растений (продуценты) в зависимости от видовой принадлежности могут нести геохимическую информацию о различных территориальных единицах (5–25 м²) (локальный мониторинг). Например, полынь обыкновенная

(*Artemisia vulgaris* L.) (длиннокорневищное, однолетнее, безбарьерное растение) имеет корневую систему в объеме грунта около 3–5 м³, кроме того, в местах неглубокого залегания грунтовых вод (до 2 м) может своим составом характеризовать их качество, а, следовательно, отвечать за всю площадь распространения вод выше по потоку. С другой стороны, проба органов и тканей живого организма (травоядного, консумент I порядка), так же в зависимости от вида, может нести репрезентативную геохимическую информацию о площади потенциального питания (с учетом площадного эффекта основного пищевого ресурса – флоры) (региональный мониторинг). Что же касается консументов II порядка (хищников), то состав их пищевого ресурса может представлять основные геохимические особенности отдельных регионов (территорий). Таким образом, использование в рамках эколого-геологических исследований комплекса методов лито- и биогеохимической съемки позволяет, во-первых, провести комплексную оценку состояния почвогрунтов с учетом как валового, так и подвижного состава поллютантов, а во-вторых, избежать систематических ошибок, связанных с отбором костных компонентов экосистем.

Для исследований наиболее подходят консументы первого порядка (фитофаги) и/или редуценты и гумусообразователи (подстилочники), которые могут быть представлены в экосистемах живыми организмами различных таксонов (черви, членистоногие, земноводные, пресмыкающиеся, птицы, млекопитающие и др.) [19]. Основным источником пищи для таких организмов – растения и про-

дукты их существования (растительный опад). Используя фитофаги в качестве аккумулятивных зооиндикаторов, можно проследить и рассчитать параметры транслокации поллютантов (прежде всего тяжелых металлов и металлоидов) в биогеохимических цепях: “материнская порода (1) – почва (2) – растение (3) – фитофаг (4)”. Подобные исследования позволят оценить актуальное эколого-геологическое состояние биогеоценоза в целом (биотопа, фито- и зооценоза) [15, 21].

Для целей биоиндикации большой интерес представляет почвенная мезофауна, составляющая 90-99% биомассы и 95% всех видов животных, входящих в наземный биоценоз. По данным литературных источников [4, 13, 14, 26, 27], наиболее чувствительная к воздействию загрязнений (радиоактивными веществами (элементами), тяжелыми металлами, металлоидами и другими поллютантами) группа дождевых червей (сем. *Lumbricina*). Они достаточно точно отражают концентрацию металлов в почве и накапливают металлы в 3–5 раз больше, чем их содержится в почве. Дождевые черви в значительной степени концентрируют магний, железо, медь, свинец, марганец, цинк [23]. С другой стороны, в настоящее время в современных литературных источниках нет данных об использовании дождевых червей при оценке состояния компонентов окружающей среды, поэтому разработка такого метода – важная фундаментальная и прикладная задача.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках эколого-геологических исследований в период летней полевой учебной практики студентов 3–4 курсов кафедры экологической геологии (геологического факультета СПбГУ) в 2012 г. проведена биогеохимическая съемка на территории ряда объектов (Питкярантский р-н, Республика Карелия), имеющих сходные (установлено по результатам работ 2010–2011 гг.) геологическое, геохимическое, геоморфологическое, гидрогеологическое строения и природно-климатические условия:

- территория санитарно-защитной зоны полигона бытовых отходов (тип 1);
- прилегающие территории к дорожному полотну “старой” автодороги (тип 2);
- прилегающие территории к дорожному полотну “новой” автодороги (тип 3);

– зона золошлакоотвала, доменной выплавки чугуна (XIX в.) (тип 4);

– прилегающие территории к железнодорожному полотну (тип 5).

Схема расположения объектов исследования представлена на рис. 1.

В рамках биогеохимической съемки в качестве биологического материала были использованы представители сем. *Lumbricina* (дождевые черви). Пробоотбор проводился по равномерной сети (тип 1 и 4) и/или по профилям (тип 2, 3 и 5). 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 50H, производитель ЗАО “Научные приборы”) на содержание S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Ba, Hg, Pb, Th, U (мг/кг). С целью оценки возможности использования почвенной мезофауны в эколого-геологическом контроле проведена оценка степени специфичности геохимического воздействия различных видов при условии сходства биохимической реакции на тяжелые металлы и металлоиды в почвогрунтах.

В результате сопоставления значений средних содержаний в пробах биологического материала (по t-критерию Стьюдента с учетом соблюдения условия равенства дисперсий) установлены достоверные различия между территориями опробования (при $p < 0.05$). Для выявления зависимости распределения значений содержаний поллютантов в тканях дождевых червей разных объектов проведен факторный анализ транспонированной биогеохимической матрицы (в строках – содержания; в столбцах – точки опробования) (Q-метод факторного анализа) [8], по результатам которого можно сделать вывод о четкой дифференциации полученных аналитических результатов (рис. 2).

Наиболее однозначно обособление происходит по группам точек, относящимся к двум объектам: 1. Зона, прилегающая к “старой” автомобильной дороге (время строительства около 1970–1980 гг.) – тип 2; 2. Зона, прилегающая к железной дороге (время строительства около

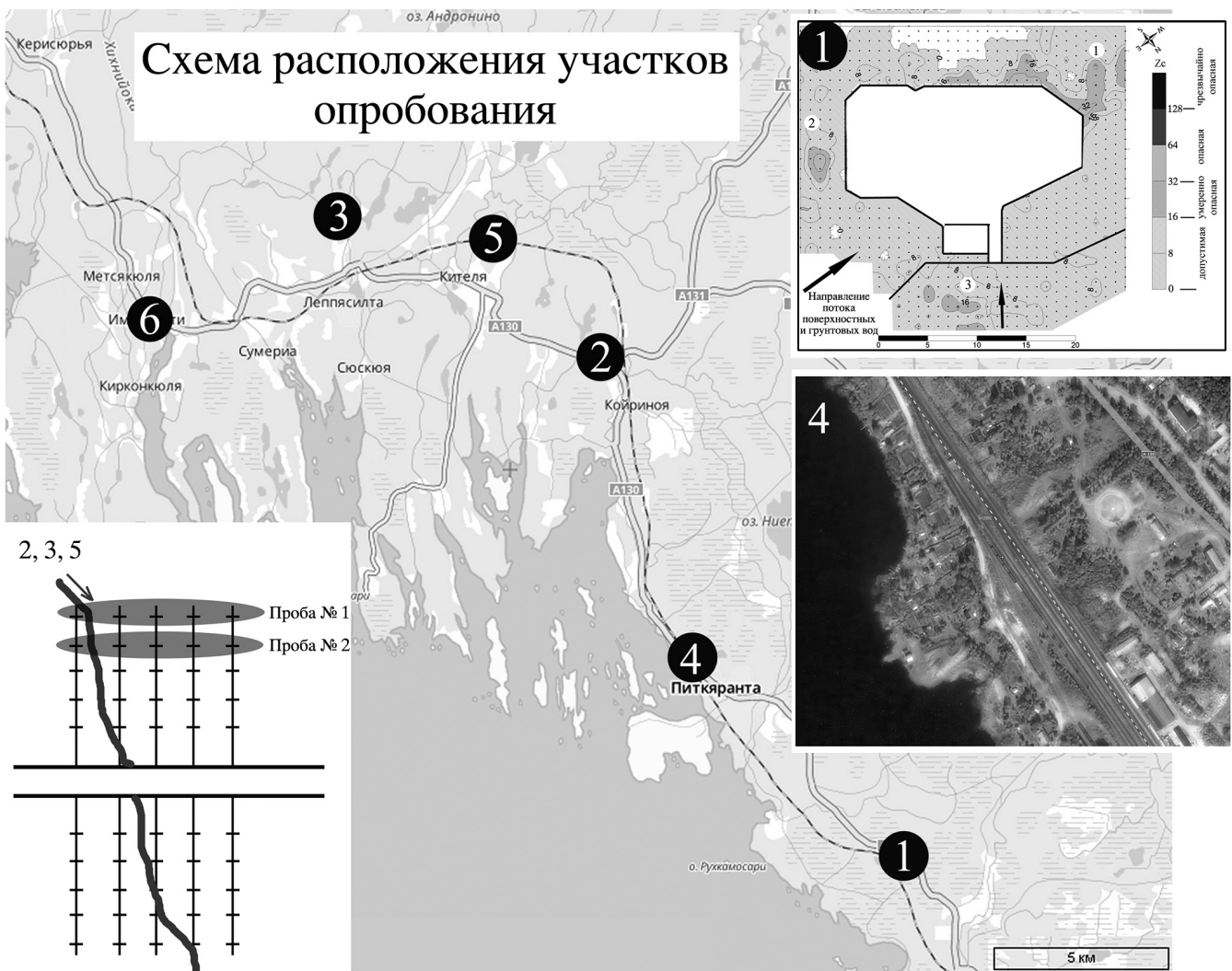


Рис. 1. Схема расположения элементарных площадок.

1950–1960 гг.) – тип 5. Такая дифференциация может быть связана со специализированным техногенным воздействием, сходным между собой по качественным и различным по количественным характеристикам, а также по продолжительности полувыведения тяжелых металлов и металлоидов из почв и горных пород, что приводит к формированию стойких полиэлементных литогеохимических аномалий вокруг транспортных магистралей.

Некоторое промежуточное положение по характеристике техногенного воздействия занимают новоосвоенные территории, а именно зона, прилегающая к новой автомобильной трассе (2000-е годы строительства) – тип 3. В связи с этим исследованную территорию можно отнести к площадке с неспецифичной, низкой по интен-

сивности и непродолжительной антропогенной нагрузкой или условно фоновой.

На диаграмме распределения факторных нагрузок близко расположены точки еще двух объектов: зоны интенсивного воздействия свалочно-го тела полигона бытового мусора г. Питкяранта, согласно данным ранее проведенных исследований [22], – тип 1; и территории золошлакоотвала, почвогрунты которого характеризуются высокими значениями содержаний Cu, Zn, Fe, Ca, As, Pb, Sn, Cd, и др. элементов [1], – тип 4. Это также может свидетельствовать о сходстве по направлению и интенсивности техногенного воздействия на эти объекты.

По полученным результатам можно сделать заключение о наличии четкой статистически значимой неоднородности биогеохимической выборки и возможности использования данных содержа-

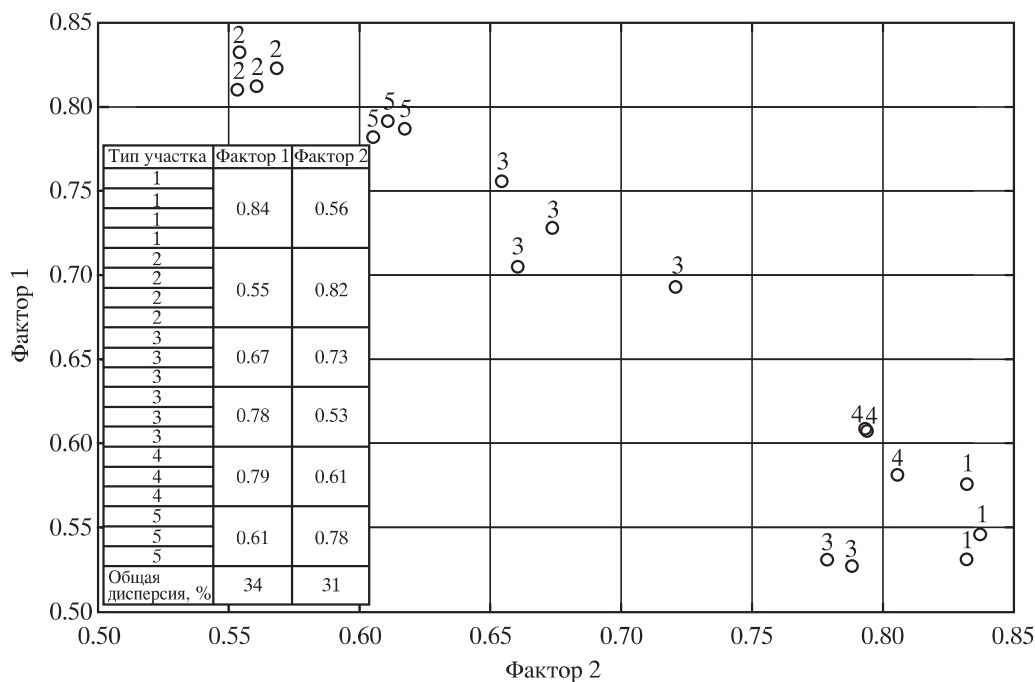


Рис. 2. Результаты факторного анализа содержаний поллютантов в тканях дождевых червей в области воздействия различных антропогенных источников: территория санитарно-защитной зоны полигона бытовых отходов (тип 1); прилегающие территории к дорожному полотну “старой” автомагистрали (тип 2); прилегающие территории к дорожному полотну “новой” автомагистрали (тип 3); зона золошлакоотвала (тип 4); прилегающие территории к железнодорожному полотну (тип 5).

ния тяжелых металлов в тканях дождевых червей (сем. *Lumbricina*) при эколого-геологической оценке (в том числе и сравнительной) состояния территории техногенных и природных (фоновых) объектов.

С целью дополнительного обоснования полученных результатов и оценки состояния почв и горных пород в пределах селитебной функциональной зоны в 2013 г. было проведено комплексное лито- и биогеохимическое опробование территории селитебной зоны в пос. Импилахти (Питкярантского р-на Республики Карелия). Опробование проводилось по четырем 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 аэрогенного воздействия движения автотранспорта, согласно [12]) (рис. 3). Методы отбора и пробоподготовки почвогрунтов использовались стандартные, согласно ГОСТ 17.4.4.02-84 “Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, микробиологического, гельминтологического анализа” [11]. Работа с биологическим материалом (целым организмом дождевых червей) выпол-

нялась согласно ранее разработанной автором методике [20].

Статистическая обработка данных содержания тяжелых металлов (Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Cd, Hg и Pb), металлоидов (As) и Са проводилась с использованием корреляционного, факторного и кластерного анализов. Последний представляет собой совокупность методов, позволяющих классифицировать многомерные наблюдения, каждое из которых описывается набором исходных переменных. Основная цель его использования в рамках исследования заключается в объединении объектов или признаков (содержаний элементов) в кластеры, используя меру расстояния между объектами или признаками. В качестве меры расстояния (сходства) между объектами выступает квадрат евклидова расстояния, а между признаками – коэффициент корреляции Пирсона (r). Разбиение выборки на группы схожих объектов позволяет упростить дальнейшую обработку данных, выявляя связи между химическими элементами [24, 25].

Расчеты проводили с помощью пакетов программ Statistica 6.0 и Microsoft Office Excel; создание графических материалов – программ CorelDraw 12, Adobe Photoshop 8.0, Surfer 9.0 и др.



Рис. 3. Схема проведения лито- и биогеохимического опробования в пос. Импилахти (Питкярантский р-н, Респ. Карелия), 2013 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам эколого-геологического анализа литогеохимической выборки, полученной по территории пос. Импилахти (2013 г.) установлены более чем двухкратные превышения фоновых содержаний для таких элементов, как Cu, Zn, As, Cd и Pb. По значению коэффициентов радиальной

дифференциации [16] выявлены природные источники (материнские породы почв) литогеохимических аномалий Cr, Cu и Zn; антропогенное происхождение на территории исследования имеют As, Cd и Pb. Значения суммарного показателя загрязнения, рассчитанные по K_k (≥ 1.5), As, Cd, Pb, Zn и Cu находятся в пределах “допустимой” и “умеренно опасной” категории загрязнения.

Таблица 1. Кларки концентрации, фоновые и статистические параметры содержаний химических элементов биогеохимической выборки по территории селитебной зоны пос. Импилахти (2013 г.), мг/кг

| Элементы | Кларк живого вещества* | Фоновая концентрация** | Геометрическое среднее | Медиана | Минимум | Максимум | 25% квартиль | 75% квартиль | Стандартное отклонение |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|---------|---------|----------|--------------|--------------|------------------------|
| Ca | 10500 [2] | 8500 | 6921 | 7024 | 3478 | 10609 | 6065 | 8176 | 1494 |
| Cr | 27 [2] | 62 | 32.8 | 32.5 | 17.0 | 68.0 | 28.5 | 39,0 | 10.8 |
| Mn | 560 [2] | 340 | 237.6 | 235.5 | 118.0 | 450.0 | 210.5 | 265.5 | 62.3 |
| Fe | 25000 [2] | 24000 | 22038 | 20332 | 12569 | 45607 | 16840 | 28663 | 8717 |
| Co | 3.5 [3] | 4 | 3.8 | 3.0 | 3.0 | 7.8 | 3.0 | 5.0 | 1.5 |
| Cu | 2.5 [2] | 11 | 15.8 | 16.0 | 5.0 | 75.0 | 9.5 | 22.5 | 14.3 |
| Zn | 160 [2] | 450 | 816.8 | 890/0 | 272.0 | 2136.0 | 609.0 | 1095,0 | 417.4 |
| As | 5 [3] | 8 | 14.0 | 14.8 | 7.4 | 21.5 | 12.7 | 16.3 | 3.4 |
| Cd | 3 [3] | 5 | 6.0 | 6.0 | 2.0 | 15.0 | 4.0 | 9.5 | 3.6 |
| Hg | 0.7 [3] | 3 | 2.5 | 2.0 | 1.9 | 8.0 | 2,0 | 3.1 | 1.4 |
| Pb | 4.5 [3] | 20 | 13.8 | 13.7 | 7.1 | 34.0 | 10.8 | 17.0 | 6.2 |

* по данным Алексеевко В.А. (1997) [1] и Барабанова В.Ф. (1985) [2, 3];

** фоновые концентрации рассчитаны по результатам статистической обработки содержаний исследуемых элементов в образцах, отобранных на объекте № 3 в 2012 г.

Для оценки показателей линейной зависимости содержания поллютантов в почвах, горных породах и тканях дождевых червей проведен корреляционный анализ, позволивший установить достоверно высокие значения коэффициентов корреляции Пирсона по содержанию Zn (0.83), Pb (0.88), As (0.91) и Cd (0.86), для остальных элементов корреляция незначима, значения менее 0.5.

Для повышения точности статистического анализа использован стандартный комплекс методов гомогенизации биогеохимической выборки, в качестве границ доверительного интервала принят предел $\pm 3\delta$ ($p < 0.05$), в результате исключены случайные ошибки из оцениваемой выборки (как положительные (“выбросы”), так и отрицательные (“геохимические дыры”) [18]). По данным диаграмм распределения значений содержаний тяжелых металлов, металлоидов и Са установлено, что для ряда исследуемых элементов (Са и As) закон распределения близок к нормальному, что может свидетельствовать об однородном геохимическом поле либо антропогенного (например, для As), либо природного происхождения (например, щелочные выделения желез стенки средней кишки дождевых червей, которые нейтрализуют кислые пищевые массы, содержат большое количество кальция [17]).

Для всех тяжелых металлов была отвергнута гипотеза о гауссовом распределении ($p < 0.05$) и выполнено логарифмическое преобразование переменных. Установлено соответствие гипотезы о логнормальном распределении, что позволяет использовать для интегральной оценки биогеохимического поля среднее геометрическое их содержания (табл. 1).

По данным сопоставления кларковых и фоновых значений содержаний элементов в живом веществе с устойчивыми оценками математического ожидания, рассчитанными по гомогенизированной выборке, установлено, что содержание Са, Mn и Fe находится в пределах кларков [2, 3]; Cr, Co, Hg и Pb – в пределах фоновых содержаний; Cu, Zn, As и Cd – достоверно превышают естественные концентрации (см. табл. 1).

Анализ полей корреляции биогеохимических данных показывает, что зависимости между переменными (Cu-Cr, Cu-Fe, Fe-Cr, Mn-Cr, Mn-Ca, Zn-Cu, As-Fe, As-Zn и Hg-Cd) близки к линейной, и выделение ассоциативных связей распределения концентраций определяемых переменных возможно. Для выделения групп химических элементов использован комплекс методов многомерного статистического анализа и, в частности, факторный и кластерный анализы.

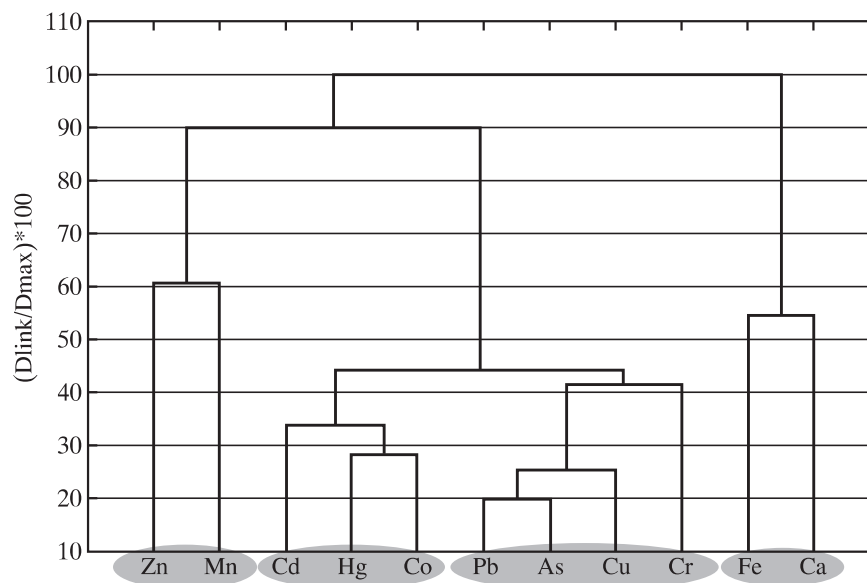


Рис. 4. Дендрограмма распределения содержаний элементов в тканях дождевых червей.

В результате проведенного факторного анализа выборочной совокупности установлено (по критерию “каменистой осыпи”), что можно ограничиться тремя значимыми факторами. Первый фактор, дающий наибольший вклад в общую дисперсию, – 34% (табл. 2), связан с распределением на исследуемой территории элементов, принадлежащих, согласно геологической классификации [10], к группе сидерофилов – Cr, Mn и Fe. Сходным типом распределения обладает еще и щелочноземельный металл – Ca. Происхождение подобной группы может быть обусловлено средообразующими (фазообразующими) свойствами (Ca, Mn, Fe), а присутствие хрома является в некоторой степени

подтверждением природных причин ее (группы) происхождения на территории обследования (коэффициент радиальной миграции и валовое содержание в грунтах не выше фоновых по району исследования). Второй фактор (23%, см. табл. 2) контролирует распределение группы элементов (Cd, Hg и Co), которая благодаря сходным физико-химическим свойствам может частично концентрироваться на геохимическом барьере в грунтах одного типа – окислительный, щелочной [9]. Кроме того, Hg и Cd – элементы второй побочной подгруппы, обладающие сходными свойствами и относящиеся к типичным органофилам в естественных почвах [7]. Третий фактор (14% общей дисперсии, см. табл. 2) характеризует особенности поведения Zn и As, концентрации которых в несколько раз превышают кларковые и фоновые значения, установленные для территории исследования. Сходство распределения этих элементов, можно было бы связать с общим техногенным источником поступления, но по данным расчета коэффициента радиальной дифференциации ведущую роль в формировании количественных характеристик геохимического поля Zn занимает состав материнской (почвообразующей) породы, поэтому антропогенный источник можно подтвердить только для As.

Таблица 2. Значение факторных нагрузок содержаний элементов

| Элемент | Фактор 1 | Фактор 2 | Фактор 3 |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Ca | 0.76 | -0.17 | -0.51 |
| Cr | 0.85 | -0,04 | 0.16 |
| Mn | 0.87 | 0.04 | -0.07 |
| Fe | 0.83 | 0.001 | 0.46 |
| Co | 0.09 | 0.61 | -0.42 |
| Cu | 0.57 | 0.01 | 0.63 |
| Zn | 0.12 | 0.29 | 0.84 |
| As | 0.14 | 0.22 | 0.84 |
| Cd | 0.07 | 0.80 | 0.29 |
| Hg | -0.28 | 0.74 | 0.07 |
| Pb | 0.51 | 0.50 | -0.09 |
| Общая дисперсия | 34% | 23% | 14% |
| Собственное значение фактора | 0.38 | 0.26 | 0.16 |

С целью установления (подтверждения) состава выделенных групп элементов и оценки степени их взаимосвязи проведен кластерный анализ значений их содержаний в тканях дождевых червей. На дендрограмме (рис. 4), построенной по исходным гомогенизированным данным, установлен состав биогеохимических ассоциаций (по

степени сходства, по множеству свойств и скрытых причин), несколько отличающийся от состава групп, выделенных по результатам применения метода главных компонент (см. табл. 2).

Можно сказать, что кластерный анализ дополняет факторный и помогает принять более правильное решение при выделении однородных совокупностей. Кроме того, представляет интерес и сама дендрограмма, наглядно характеризующая типизацию элементов по их свойствам и особенностям распределения.

С высокой степенью вероятности подтверждено 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. 3), что также подтверждается результатами факторного анализа (см. табл. 2) и, как следствие, отражается на биогеохимическом поле. Вторую группу (Pb, As, Cu и Cr) составляют элементы, которые также замедляют свою миграцию в области наличия восстановительного щелочного геохимического барьера в грунте, расположенного в восточной части исследуемой территории (см. рис. 3, 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 произведен расчет коэффициентов концентрации по отношению к условно фоновым значениям (см. табл. 1), полученным по результатам биогеохимической съемки 2012 г., проведенной на территории со сходным геологическим строением и невысокой техногенной нагрузкой (рис. 5). Кроме того, полученные расчетным методом фоновые уровни сопоставлены с литературными данными по содержанию элементов в тканях дождевых червей [6, 13, 23], в результате чего установлены условные нормы содержания исследуемых элементов в органах и тканях почвенной мезофауны.

По данным рис. 5, можно составить ряд элементов по возрастанию средних значений коэффициентов концентрации (по отношению к расчетному фону) (для значений <1) $Cd > Cu > As > Zn$. Установлено, что наиболее высокими значениями показателя контрастности биогеохимической аномалии обладают Cu, Zn и Cd, что позволяет говорить о наличии постоянного их притока в

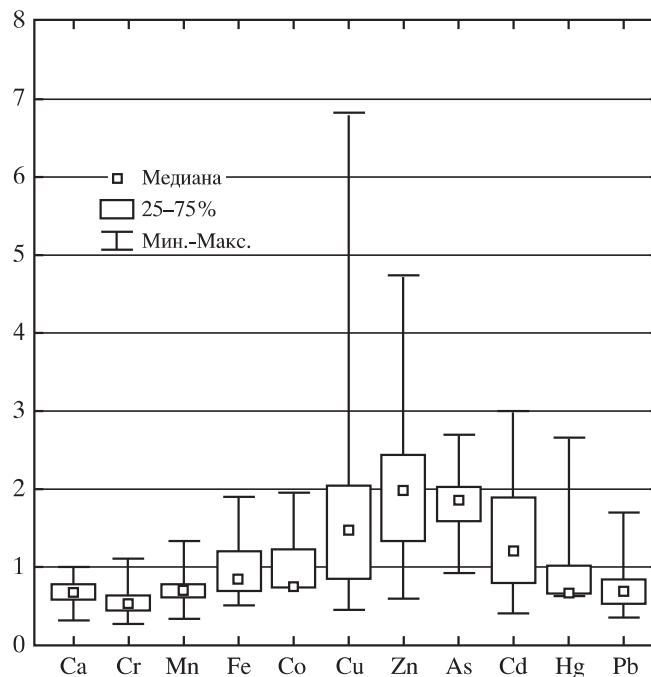


Рис. 5. Диаграммы распределения значений коэффициентов концентрации элементов, по отношению к фоновым значениям, в тканях дождевых червей.

систему в различных, в том числе и биодоступных формах.

В результате проведенного исследования можно сделать заключение, на основании установленных значимых коэффициентов линейной корреляции в системе горная порода – живое вещество, что по K_k элементов в биологическом материале подтверждено наличие геохимических аномалий Zn, Cu, As и Cd природного и/или антропогенного происхождения. Кроме того, установлено наличие в грунте аномалии Pb, но в связи с отсутствием сходных результатов в биогеохимическом опробовании можно сделать заключение о малодоступности свинца для живых организмов и растений на территории исследования.

В работе Р.Р. Брукса описана методика [5], где в качестве основного показателя выбора индикатора для проведения биогеохимических работ предлагается номинальное значение стандартного отклонения коэффициента концентрации по отношению к фоновым значениям. Это связано с тем, что эффективность биогеохимического исследования, в конечном счете, зависит от постоянства значения K_k , т.е. от постоянства и однородности совокупности значений. По результатам анализа значений стандартного отклонения (табл. 3) оцениваемых элементов установлено, что для мониторинговых биоиндикационных работ при оценке степени загрязнения селитебных территорий

Таблица 3. Стандартное отклонение среднего K_k содержания элементов в тканях дождевых червей по отношению к фоновым уровням

| Элемент | Стандартное отклонение среднего K_k |
|---------|---------------------------------------|
| Ca | 0.14 |
| Cr | 0.17 |
| Mn | 0.18 |
| Fe | 0.36 |
| Co | 0.36 |
| Cu | 1.30 |
| Zn | 0.93 |
| As | 0.43 |
| Cd | 0.71 |
| Hg | 0.46 |
| Pb | 0.31 |

можно использовать химический состав тканей дождевых червей. Наиболее информативны результаты съемки аномалий Cu, Zn и Cd. Отсутствие высоких значений стандартного отклонения K_k Pb свидетельствует об эффективности механизмов защиты от его поступления во внутреннюю среду, что может быть осуществлено за счет создаваемых щелочных условий в желудочно-кишечном тракте, в которых ионы свинца переходят в малодоступную форму и связываются с иллитной фракцией [7].

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований в 2012–2013 гг. на территории научно-исследовательского полигона Санкт-Петербургского государственного университета в пос. Импилахти (Республика Карелия, Питкярантский р-н) получены следующие результаты и составлены рекомендации.

1. Установлена четкая дифференциация различных по характеру и интенсивности антропогенного воздействия техногенных объектов, по результатам факторного анализа транспонированной биогеохимической матрицы, которые свидетельствуют о наличии четкой статистически значимой неоднородности биогеохимической выборки и возможности использования состава тканей представителей сем. *Lumbricina* в эколого-геологических исследованиях, а также о возможности разработки геохимических критериев поиска месторождений полезных ископаемых.

По данным анализа комплексной (лито- и биогеохимической) съемки территории селитебной зоны получены высокие значения коэффициен-

тов линейной корреляции между содержанием поллютантов в грунтах и тканях представителей сем. *Lumbricina*. Используемая 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).

2. В результате применения комплекса методов статистической обработки установлен состав двух групп элементов со сходными параметрами распределения в живом веществе. Первая группа элементов – Cd, Hg и Co, в почвах вероятнее всего концентрируется на окислительном щелочном геохимическом барьере, а высокие значения коэффициентов линейной корреляции говорят о “наследовании” геохимических особенностей грунтов живым веществом. Элементы второй группы – Pb, As, Cu и Cr в условиях нахождения в почвогрунтах теряют свою подвижность на восстановительном щелочном геохимическом барьере. Объединение этих элементов может быть связано с общим источником их техногенного и/или природного поступления. Для Cu по данным проведенного анализа установлена ведущая геохимическая связь с составом материнских пород; Pb имеет с остальными элементами группы обратную (отрицательную) связь, что может быть связано с невысоким уровнем загрязнения селитебной территории, а также наличием эффективных механизмов защиты от поступления во внутреннюю среду или выведения из организма. As и Cr наиболее вероятно динамически связаны с общим техногенным источником поступления в окружающую среду, например, являясь типоморфными элементами углей, могут быть связаны с сжиганием дров и торфяных брикетов жителями поселка. Таким образом, используя только зоогеохимические данные, можно проводить изучение и оценку состояния компонентов окружающей среды и картирования геохимических барьеров.

3. С целью повышения качества проводимых исследований и репрезентативности получаемых результатов с использованием представителей сем. *Lumbricina* необходимо в дальнейшем во время отбора проб проводить учет общей численности почвенной мезофауны (не только представителей сем. *Lumbricina*) и плотности особей дождевых червей с учетом степени загрязнения почв. Кроме того, в связи с отсутствием литературных данных о геохимической специализации при накоплении элементов представителями раз-

ных таксонов внутри сем. *Lumbricina* следует проводить определение отбираемых особей до уровня вида. Для оценки потенциальной способности биопоглощения тяжелых металлов и металлоидов из почвогрунтов и пищевых ресурсов (остатков растений) необходимо параллельно отбору проб биоматериала провести закладку серии экспериментов в лабораторных условиях с использованием грунтов и фиторесурсов различной степени загрязнения.

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 еще недостаточно разработанное направление. 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. Аксюткин С.В., Беляев А.М. Эколого-геологическая оценка шлаковых отвалов металлургического производства Питкярантского горнорудного района (Республика Карелия) // Матер. V Межвуз. студенческой конф. "Школа экологической геологии и рационального недропользования". СПб.: Изд. СПбГУ, 2004. С. 185–186.
2. Алексеев В.А. Химические элементы в биосфере. Краснодар: Изд. КГТУ, 1997. 98 с.
3. Барбанов В.Ф. Геохимия. Л.: Недра, 1985. 423 с.
4. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / Под ред. Р. Шуберга. М.: Мир, 1988. 350 с.
5. Брукс Р.Р. Биологические методы поисков полезных ископаемых / Пер. с англ. М.: Недра, 1986. 311 с.
6. Бутковский Р.О. Устойчивость комплексов почвообитающих членистоногих к антропогенным воздействиям. М.: День серебра, 2001. 322 с.
7. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почве. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. 83 с.
8. Ворошилов В.Г. Методика выявления структуры аномалий геохимических полей рудных месторождений // Изв. Том. политех. ун-та. 2004. Т. 307. № 2. С. 55–61.
9. Глазовская М.А. Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенному воздействию. М.: Изд-во МГУ, 1997. 102 с.
10. Гольдшмидт В.М. Принципы распределения химических элементов в минералах и горных породах // Успехи химии. 1938. Т. 7. Вып. 2. С. 288–320.
11. ГОСТ 17.4.4.02–84 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Изд-во стандартов, 1985.
12. Инструкция по проектированию линейно-кабельных сооружений связи. (ВСН 116-93). Утверждены приказом Министерства связи Российской Федерации от 15.07.1993 г. № 168. Москва, Гипросвязь, 1993. 57 с.
13. Криволицкий Д.А. Почвенная фауна в экологическом контроле. М.: Наука, 1994. 268 с.
14. Криволицкий Д.А., Гиляров М.С. Жизнь в почве. М.: Молодая гвардия, 1985. 240 с.
15. Куриленко В.В., Осоловская Н.Г. и др. Основы экогеологии, биоиндикации и биотестирования водных экосистем / Под ред. В.В. Куриленко. СПб.: Изд. СПбГУ, 2004. 448 с.
16. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Изд-во МГУ, 2013. 168 с.
17. Перель Т.С. Распространение и закономерности распространения дождевых червей фауны СССР. М.: Наука, 1979. 137 с.
18. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 762 с.
19. Подлипский И.И. Биогеохимические методы съемки в эколого-геологических исследованиях // Матер. III Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, 11–15 февраля. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. С. 460–471.
20. Подлипский И.И. Аккумулятивная биоиндикация (на примере, сем. *Lumbricina*) в эколого-геологической оценке состояния почво-грунтов // Матер. XIV межвуз. молодежной научной конф. "Школа экологической геологии и рационального недропользования". СПб.: Изд. СПбГУ, 2014. С. 91–101.
21. Подлипский И.И. Аккумулятивная биоиндикация в инженерно-экологических изысканиях // Инженерные изыскания. 2014. № 1. С. 44–52.
22. Подлипский И.И. Эколого-геологическая оценка прилегающих территорий полигона бытовых отходов г. Питкяранта (Республика Карелия) // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2013. Вып. 2. С. 48–56.
23. Покаржевский А.Д. Геохимическая экология наземных животных. М.: Наука, 1985. 300 с.
24. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Учебник для вузов. М.: Недра, 1985. 294 с.

25. Ярошевский А.А. Применение математики в геохимии: некоторые типы задач и методы решения // *Науки о земле. Соровский образоват. журн.* 1996. № 7. С. 67–73.
26. Grelle C., Descamps M. Heavy metal accumulation by *Eisenia fetida* and its effects on Glutathione S-Transferase activity // *Pedobiologia.* 1998. № 42. P. 289–297.
27. Heikins A., Peijnenburg W.J.G.M., Hendriks A.J. Bioaccumulation of heavy metals in terrestrial invertebrates // *Environmental pollution.* 2001. № 113. P. 385–393.
- fundamentals of assessing ecological and geochemical resistance of soils to anthropogenic impact]. Moscow, Izd. Mosk. Gos. Univ., 1997, 102 pp. (in Russian).
10. Gol'dshmidt, V.M. *Printsipy raspredeleniya khimicheskikh elementov v mineralakh i gornykh porodakh* [Principles of chemical elements distribution in minerals and rocks]. *Uspekhi khimii*, 1938, vol. 7, issue 2, pp. 288–320 (in Russian).
11. *GOST 17.4.4.02–84 Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza* [State Standard. 17.4.4.02–84 Nature Conservation. Soils. Methods of Sampling and Sample Preparation for chemical, bacteriological, and helminthologic analyses]. Moscow, Izd. standartov, 1985 (in Russian).

REFERENCES

1. Aksyutkin, S.V., Belyaev, A.M. [Ecological and geological assessment of metallurgical slag dumps in Pitkyaranskii ore-mining area, Karelia Republic] *Mater. V Mezhdunar. Studencheskoi Konf. "Shkola ekologicheskoi geologii i ratsional'nogo nedropol'zovaniya* [Proc. 5th student conf. "School of ecological geology and rational use of the Earth's interior]. St. Petersburg, Izd. SPbGU, 2004, pp. 185–186 (in Russian).
2. Alekseenko, V.A. *Khimicheskie elementy v biosphere* [Chemical elements in the biosphere]. Krasnodar, Izd. KGTU, 1997. 98 pp. (in Russian).
3. Barabanov, V.F. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Leningrad, Nedra, 1985. 423 pp. (in Russian).
4. *Bioindikatsiya zagryazneniy nazemnykh ecosystem* [Bioindication of contamination in surface ecosystems]. R. Shubert, Ed. Moscow, Mir, 1988. 350 pp. (in Russian).
5. Brooks, R.R. *Biologicheskie metody poiskov poleznykh iskopaemykh* [Biological Methods of Prospecting for Minerals] Transl. From English, Moscow, Nedra, 1986. 311 pp. (in Russian).
6. Butovskii, R.O. *Ustoichivost' kompleksov pochvoobitayushchikh chlenistonogikh k antropogennym vozdeistviyam* [Resistance of soil-inhabiting arthropoda complexes to anthropogenic impacts]. Moscow, Den' serebra Publ., 2001, 322 pp. (in Russian).
7. Vodyanitskii, Yu.N. *Tyazheluye metally i metalloidy v pochve* [Heavy metals and metalloids in soil]. Moscow, Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Academy of Agricultural Sciences, 2008, 83 pp. (in Russian).
8. Voroshilov, V.G. *Metodika vyyavleniya struktury anomalii geokhimicheskikh polei rudnykh mestorozhdenii* [Technique of revealing anomalies in geochemical fields structure of ore deposits]. *Izvestiya Tomskogo politekh. univ.*, 2004, vol. 307, no. 2, pp. 55–61 (in Russian).
9. Glazovskaya, M.A. *Metodologicheskie osnovy otsenki ekologo-geokhimicheskoi ustoichivosti pochv k tekhnogennomu vozdeistviyu* [Methodological
12. *Instruktsiya po proektirovaniyu lineino-kabel'nykh sooruzhenii svyazi* [Instruction for designing of cable communication lines]. (VSN 116–93). Adopted by the order of Communication Ministry RF 15.07.1993. No. 168. Moscow, Giprosvyaz', 1993. 57 pp. (in Russian).
13. Krivolutskii, D.A. *Pochvennaya fauna v ekologicheskoy kontrole* [Soil fauna in ecological control]. Moscow, Nauka, 1994, 268 pp. (in Russian).
14. Krivolutskii, D.A., Gilyarov, M.S. *Zhizn' v pochve* [Life in soil]. Moscow, Molodaya gvardiya, 1985, 240 pp. (in Russian).
15. Kurilenko, V.V., Osmolovskaya, N.G., et al. *Osnovy ekogeologii, bioindikatsii i biotestirovaniya vodnykh system* [Fundamentals of ecogeology, bioindication, and bio-testing of aquatic ecosystems] Kurilenko, V.V., Ed. St. Petersburg, Izd. SPbGU, 2004, 448 pp. (in Russian).
16. Motuzova, G.V. *Soedineniya mikroelementov v pochvakh: sistemnaya organizatsiya, ekologicheskoe znachenie, monitoring* [Trace elements compounds in soils: system organization, ecological role, and monitoring]. Moscow, Izd. MGU, 2013. 168 pp. (in Russian).
17. Perel' T.S. *Rasprostraneniye i zakonomernosti rasprostraneniya dozhdevykh chervei fauny SSSR* [Distribution and distribution regularities of earthworms in the USSR fauna]. Moscow, Nauka, 1979. 137 pp. (in Russian).
18. Perel'man, A.I., Kasimov, N.S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Astreya-2000, 1999, 762 pp. (in Russian).
19. Podlipskii, I.I. [Biochemical survey methods in ecological and geological research] *Mater. III Mezhdunar. Nauchno-prakt. Konf. Molodykh uchenykh i spetsialistov pamyati akad. A.P. Karpinskogo* [Proc. 3rd International Sci. and Pract. Conference of young professionals in commemoration of academician A.P. Karpinskii], St. Petersburg, VSEGEI, 2013, pp. 460–471 (in Russian).

20. Podlipskii, I.I. *Accumulative bioindication (by the example of Lumbricina fam.) in ecological and geological assessment of soil state.* // *Mater. XIV Mezhdv. Studencheskoi Konf. "Shkola ekologicheskoi geologii i ratsional'nogo nedropol'zovaniya* [Proc. 14th student conf. "School of ecological geology and rational use of the Earth's interior]. St. Petersburg, Izd. SPbGU, 2014, pp. 91–101 (in Russian).
21. Podlipskii, I.I. *Akkumulyativnaya bioindikatsiya v inzhenerno-ekologicheskikh izyskaniyakh* [Accumulative bioindication in engineering and ecological survey]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2014, no. 1., pp. 44–52 (in Russian).
22. Podlipskii, I.I. *Ekologo-geologicheskaya otsenka prilegayushchikh territorii poligona bytovykh otkhodov g. Pitkyaranta (respublika Kareliya)* [Ecological and geological assessment of adjacent areas to the municipal waste disposal site in Pitkyaranta town, Karelia Republic]. *Vestn. SPbGU*, ser.7, 2013, issue 2, 2013, pp. 48–56 (in Russian).
23. Pokarzhhevskii, A.D. *Geokhimicheskaya ekologiya nasemnykh zhivotnykh* [Geochemical ecology of land animals]. Moscow, Nauka, 1985. 300 pp. (in Russian).
24. Solovov, A.P. *Geokhimicheskie metody poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Geochemical methods of prospecting mineral deposits] Textbook. Moscow, Nedra, 1985. 294 pp. (in Russian).
25. Yaroshevskii, A.A. *Primenenie matematiki v geokhimii: nekotorye tipy zadach i metody resheniya* [Mathematics application in geochemistry: some types of problems and methods of solution]. *Nauki o Zemle. Sorovski obraz. zhurnal*, 1996, no 7. pp. 67–73 (in Russian).
26. Grelle, C., Descamps, M. Heavy metal accumulation by *Eisenia fetida* and its effects on Glutathione S-Transferase activity // *Pedobiologia*. 1998, no. 42, pp. 289–297.
27. Heikins, A., Peijnenburg, W.J.G.M., Hendriks, A.J. Bioaccumulation of heavy metals in terrestrial invertebrates // *Environmental pollutions*, 2001, no. 113, pp. 385–393.

ZOOINDICATION (LUMBRICINA FAMILY) IN ECOLOGICAL AND GEOLOGICAL ASSESSMENT OF THE SOIL STATE IN RESIDENTIAL AREAS

I. I. Podlipskii

*St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences.
Universitetskaya nab. 7/9, St. Petersburg, 19900 Russia. E-mail: primass@inbox.ru*

The concentration of heavy metals in plants is largely dependent on their content in soil; whereas their concentration in animal bodies, on their amount in food. The species of plants and animals are also important. Animals absorb only mobile forms of elements, so the pollutant concentration in animals will reflect the actual contamination of the ecosystem rather than its potential contamination, which is obtained from measuring the pollutant concentration in soil or plants.

Inhabitants of accumulating substrate represented by soil invertebrates (who integrate the combined impact of both abiotic and biotic factors) play an active part in the transformation and redistribution of organic matter, as well as in the destructive and soil-forming processes. Correspondence between the range of edaphic conditions that determine the normal activity of soil organisms and the certain community structure enhances the possibilities in bio-identification of various types of soils and processes operating in them.

For the purposes of bio-indication, the soil mesofauna constituting 90–99% of biomass and 95% of all animal species included in the land biocenosis is of great interest. Soil invertebrates, which are suitable for indication, have a number of advantages. They are quite numerous in disturbed biotopes, are sedentary, closely contact with the soil; they are the most sensitive to various changes in the environment, to radiation, to pollution of heavy metals; they are accumulators of some chemical elements, have a wide range; and the methods of sampling them are developed well enough.

Earthworms everywhere turned out to be the most sensitive group to the pollution impact. They accurately reflect the concentration of metals in soil and accumulate metals in 3–5 times higher amount than their content in soil. Earthworms largely concentrate magnesium, iron, copper, lead, manganese, and zinc.

The use of soil macrofauna in ecological and geological studies of pollution with heavy metals and metalloids in the residential areas, performed in this work, allowed us to determine unambiguously the composition of multi-element anomalies, their bioavailability and to establish the origin (natural and / or technogenic) of each of the components (elements).

Keywords: *zoo-indication, soil mesofauna, heavy metals, residential area.*