

Ю. В. Королева

## БИОИНДИКАЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

*Метод биоиндикации с использованием покровообразующих видов мхов использован для изучения атмосферных выпадений тяжелых металлов в Калининградской области. Применение графической интерпретации данных, корреляционного и факторного анализа позволило выделить антропогенную и природную составляющую загрязнения мхов.*

*The moss biomonitor technique was employed to study heavy metal precipitation in the Kaliningrad region. Graphical data interpretation, correlation and factor analysis helped distinguish the anthropogenic and natural components in moss pollution.*

**Ключевые слова:** покровообразующие виды мхов, тяжелые металлы, атмосферные выпадения, факторный анализ.

**Key words:** carpet-cover mosses, heavy metals, precipitation, factor analysis.

Покровообразующие виды мхов уже несколько десятилетий используются для оценки атмосферных выпадений тяжелых металлов (ТМ) в странах Северной Европы. Проект по ТМ во мхах координируется Центром международной программы по воздействию загрязнения воздуха на естественную растительность и сельскохозяйственные культуры (ICP Vegetation). Эта программа сосредоточена на изучении влияния озонового слоя и атмосферных выпадений ТМ на растительность. Конвенция о трансграничном атмосферном переносе загрязняющих веществ (Женева, 1979 г.) – основной документ, регламентирующий работу центра. Согласно протоколу по тяжелым металлам (Архус, 1998 г.) [1] в 36 европейских государствах, включая Россию, на основе одномоментного сбора и анализа мхов-биомониторов получают данные об атмосферных выпадениях ТМ и других элементов. Каждые 5 лет осуществляется сбор мхов с последующим химическим анализом, результаты которого публикуются в атласе атмосферных выпадений ТМ [2].

Цель исследования – выявление пространственных закономерностей атмосферных выпадений ТМ в Калининградской области, характеристика источников, оценка их вклада в общую картину регионального загрязнения.

В Калининградской области автором с 1999 по 2005 г. изучалось накопление ТМ тремя массовыми видами мхов: *Pleurosium shreberi* (Mitten, 1869), *Hilocomium splendens* (Schimper, 1852), *Scleropodium purum* (Limpr., 1896). Мхи не имеют корневой системы, поэтому их микроэлементный состав определяется составом атмосферных выпадений, в том числе минеральных частиц почвы, осаждающихся на поверхности растения под влиянием ветра. Пробы мхов (трехлетнего годового прироста растения) отбирали на открытых лесных полянах, не менее чем в 300 м от автодорог, в 100 м от жилых строений и в 5 м от крон деревьев, согласно специально разработанной мониторинговой сети. Пробы подвергались минерализации в азотной кислоте, содержание ТМ определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии [3; 4].

Анализ пространственного распределения позволил выявить зависимость осаждения ТМ от форм рельефа, направления ветрового переноса, количества осадков. В соответствии с общими циркуляционными условиями региона в течение почти всего года в приземных слоях атмосферы преобладают западные, юго-западные и южные ветры с общей повторяемостью 35–70 % [5, с. 31]. Характер ветрового переноса ТМ влияет на распределение загрязняющих веществ по территории области. На наветренных склонах даже небольших возвышенностей наблюдается более интенсивное осаждение тяжелых металлов, а в понижениях между крупными морфоструктурами рельефа формируются «ветровые коридоры». Однако при отсутствии такого «коридора» локализация зон с повышенным содержанием ТМ внутри территории объясняется влиянием местных источников загрязнения [6]. Такое распределение металлов характерно, в частности, для кадмия (рис. 1).

Различия в накоплении ТМ мхами лесных ландшафтов, возможно, связаны как с особенностями антропогенного воздействия, так и с природными факторами (растительностью, типом почв, климатическими характеристиками).

Отрасли промышленности Калининградской области – машиностроение, металлообработка, пищевая, топливно-энергетический комплекс, сельское хозяйство, добыча янтаря, нефти – определяют вероятность загрязнения территории от местных источников. Однако расположение региона в зоне влияния западноевропейских государств повышает его уязвимость к трансграничному переносу ТМ.

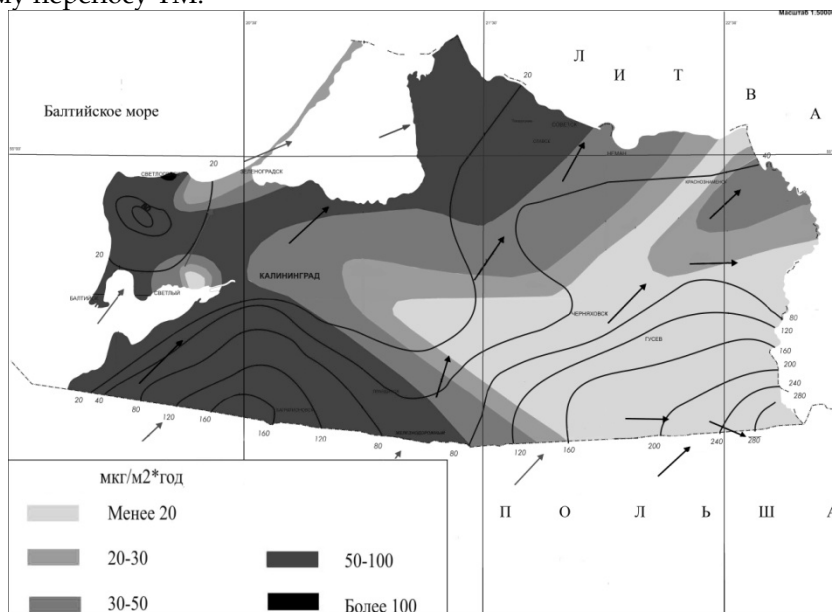


Рис. 1. Распределение атмосферных выпадений кадмия в Калининградской области под влиянием рельефа и ветрового переноса в 2005 г., в  $\text{мкг}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$

Геохимические особенности распределения и накопления ТМ мхами выявлены автором с использованием современных методов интерпретации данных: графического, корреляционного и факторного анализа. Суть графической интерпретации результатов анализа заключается в построении диаграмм, наглядно объясняющих происхождение и накопление элементов мхами. Абсолютные значения ТМ во мхах, аэрозолях воздуха и земной коре соотнесены с содержанием в них скандия. Факторы обогащения EF мхов ТМ рассчитаны по формулам:

$$EF_{\text{зк}} = \frac{C(X)_{\text{мох}}}{C(Sc)_{\text{мох}}} \cdot \frac{C(Sc)_{\text{зк}}}{C(X)_{\text{зк}}}; \quad EF_{\text{аэроз}} = \frac{C(X)_{\text{мох}}}{C(Sc)_{\text{мох}}} \cdot \frac{C(Sc)_{\text{аэроз}}}{C(X)_{\text{аэроз}}}$$

На графике (рис. 2) выделено две группы ТМ: I – элементы растительного происхождения (Mn, Fe), мхи обогащены этими элементами относительно земной коры и аэрозолей; II – элементы антропогенного происхождения. Вторая группа представлена двумя подгруппами: А – с коэффициентом обогащения относительно земной коры EF (lgEF) меньше 2 (0,3) – Cr, в этом случае очевиден вклад ветрового переноса; В – с коэффициентом обогащения EF (lgEF) больше 7 – Ag, Cu, Zn, Ni, Cd, Pb (в результате выпадения атмосферных осадков). Данные химического анализа трех видов покровообразующих мхов были интерпретированы с помощью стандартной программы SPSS Statistics 17.0, которая позволяет выполнить корреляционный анализ и анализ основных компонент [7; 8]. Совокупность данных оценивалась за период с 1994 по 2005 г. Выявились комбинации элементов с высоким коэффициентом корреляции: Fe-Cr, Ag-Cr-Ni, Mn-Cu-Zn, Ni-Zn, – что свидетельствует о едином источнике происхождения загрязнения. Наибольшее влияние среди местных источников ТМ имеет топливно-энергетический комплекс и транспорт.

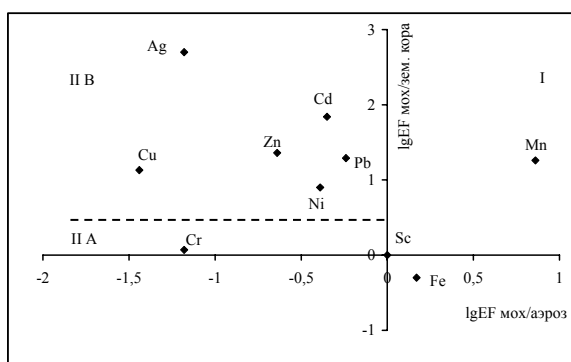


Рис. 2. Факторы обогащения мхов тяжелыми металлами

Методом анализа главных компонент (метод вращения: Варимакс с нормализацией Кайзера) были выделены четыре фактора нагрузки в порядке убывания их значимости (табл. 1). Отрицательная нагрузка означает вынос элемента при действии соответствующего фактора.

Таблица 1

**Матрица повернутых компонент**

ТМ	Компонента (фактор)			
	1	2	3	4
Fe	0,771	0,111	-0,109	0,216
Cr	0,735	<0,1	0,182	-0,249
Cu	<0,1	0,718	-0,239	<0,1
Mn	<0,1	0,661	<0,1	<0,1
Zn	0,191	0,562	0,228	<0,1
Ni	<0,1	0,114	0,784	<0,1
Ag	0,416	-0,105	0,574	<0,1
Cd	-0,205	0,185	0,348	0,725
Pb	-0,184	<0,1	0,308	-0,678

В целом на накопление ТМ мхами влияют: эрозия поверхностного слоя почв, стационарные источники (промышленные предприятия и транспорт), а также трансграничный перенос. Отрицательное значение компоненты по свинцу, вероятно, обусловлено снижением его содержания во мхах в связи с запретом на производство и использование этилированного бензина.

Для шести типов ландшафтов (по классификации В.Д. Ваулиной и И.И. Козлович [9, с. 189]) факторный анализ выявил, что мхи подвергаются разным уровням антропогенной нагрузки (табл. 2).

Таблица 2

**Воздействия различных источников загрязнения на ландшафты Калининградской области**

Ландшафт	Фактор	Предполагаемый источник	Элементы
Холмисто-моренные равнины	I	Трансграничный перенос	Cr, Cd, Cu
	II	Транспорт	Mn, Zn, Cu
	III	Промышленные объекты	Fe, Ni
Волнистые и пологохолмистые моренные равнины	I	Промышленные объекты	Fe, Cu, Pb
	II	Сжигание попутного газа при добыче нефти	Zn, Mn, Ni
	III	Трансграничный перенос	Ag
Приледниково-озерные равнины	I	Трансграничный перенос	Cd, Cu
	II	Эрозия почв	Cr
	III	Торфяные пожары	Zn, Fe
	IV	Объекты промышленности	Ni
Древнеаллювиальные равнины	I	Объекты промышленности	Cu, Cd, Ni, Fe
	II	Торфяные пожары	Zn, Fe

Дельтовые	I	Торфяные пожары	Ni, Cd, Mn,
	II	Морской аэрозоль или избыточное увлажнение	Ag, Pb, Cr
Прибрежно-морские	I	Морской аэрозоль	Cr, Cu, Zn, Mn, Ag, Cd

Мхи холмисто-моренных ландшафтов Самбийской, Вармийской, Виштынецкой возвышенностей уязвимы под воздействием трех факторов. Предположительно перенос ТМ (Cr, Cd, Cu) с атмосферными массами с территории Польши и других стран Западной Европы имеет наибольшее значение по сравнению с двумя другими: выбросами от автотранспорта и промышленных предприятий.

Мхи ландшафтов волнистых и пологохолмистых моренных равнин, вероятно, подвергаются воздействию промышленных центров Калининграда и Черняховска, объектов нефтедобывающего комплекса, которые вносят немалый вклад в общую картину загрязнения. Для этого типа ландшафта характерно высокое содержание серебра во мхах, объяснимое трансграничным переносом.

Ландшафт приледниково-озерных равнин загрязняется под воздействием почвенной эрозии, пожаров торфяников, выбросов промышленных объектов и трансграничного переноса со стороны стран Западной Европы. Последний фактор имеет существенное влияние на распределение кадмия и меди.

Древнеаллювиальные равнины – Шешупе-Неманское междуречье на северо-востоке Калининградской области и приустьевая часть долины р. Преголи – отличаются по уровню антропогенной нагрузки. Факторный анализ позволил выделить две компоненты: южная часть предположительно подвергается воздействию выбросов промышленных предприятий, а северная – пожаров торфяников.

Дельтовый ландшафт в приустьевом понижении реки Неман также испытывает влияние двух факторов. Торфяные пожары способны повлиять на избыточное накопление мхами Ni, Cd и Mn, а атмосферное облако аэрозолей Вислинского залива – на накопление Ag, Pb, Cr.

Прибрежно-морские ландшафты подвергаются активному влиянию морских аэрозолей, поступающих с акватории Балтийского моря, с атмосферными осадками здесь выпадают Zn, Mn, Fe, Cu.

Таким образом, факторный анализ позволил дать характеристику источников загрязнения Калининградской области за период 1994–2005 гг. За это время изменилась нагрузка на биосистемы, значительно снизились выбросы ТМ в Европе [10]. Дальнейший анализ и оценка вкладов различных источников и трансграничного переноса загрязняющих веществ необходимы для более обоснованной стратегии развития Калининградской области в сфере землепользования, охраны окружающей среды и здоровья населения.

#### Список литературы

1. *Protocol on heavy metals*: [site of UNECE]. URL: [http://www.unece.org/env/lrtap/hm\\_h1.htm](http://www.unece.org/env/lrtap/hm_h1.htm) (дата обращения: 01.04.2010).
2. *Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe 1995–1996*. Copenhagen, 1998.
3. *Барينو́ва Г.М.* Калининградская область. Климат. Калининград, 2002.
4. *Heavy Metals in European Mosses: 2005/2006 Survey*. Monitoring Manual, Bangor, 2005: [site of ICP Vegetation]. URL: [http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/moss\\_survey.html](http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/moss_survey.html). (дата обращения: 11.04.2007).
5. *Руководство ЕМЕП по отбору проб и химическому анализу* / пер. с англ.; под ред. А.Г. Рябошапко: [site of NILU]. URL: <http://tarantula.nilu.no/projects/ccs/manual/index.html>. (дата обращения: 01.04.2010).
6. *Королева Ю.В., Барино́ва Г.М., Пухлова И.А.* Использование ГИС-технологий для оценки трансграничного переноса тяжелых металлов // Мат-лы междунар. конф. Интеркарто/ИнтерГИС-15 «Устойчивое развитие территорий. Теория ГИС и практический опыт». Пермь, 2009. С. 576–581.
7. *Rahn K.A.* A Graphical Technique for Distinguish Plant Material and Soil from Atmospheric Deposition in Biomonitoring // *Proceedings BioMap-1997*. Lisboa, 1997. P. 47–62.
8. *Yuana H., Rahn K.A., Zhuang G.* Graphical techniques for interpreting the composition of individual aerosol particles // *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38, issue 39. P. 6845–6854.
9. *Калининградская область: очерки природы* / сост. Д.Я. Беренбейм; науч. ред. В.М. Литвин. Калининград, 1999.
10. *Harmens H., Mills G., Hayes F., Williams P.* et. al. Air Pollution and Vegetation ICP Vegetation. Annual Report. 2004/2005, Bangor: [site ICP Vegetation]. URL: [http://icpvegetation.ceh.ac.uk/research/documents/Air\\_pollution\\_and\\_vegetation\\_2005.pdf](http://icpvegetation.ceh.ac.uk/research/documents/Air_pollution_and_vegetation_2005.pdf) (дата обращения: 01.04.2010).

**Об авторе**

Ю. В. Королева – канд. геогр. наук, доц., РГУ им. И. Канта, [Zakatoff@rambler.ru](mailto:Zakatoff@rambler.ru)

**Author**

Dr. Yu. V. Korolyova -Associate Professor, IKSUR, [Zakatoff@rambler.ru](mailto:Zakatoff@rambler.ru)