

УДК 551.510.42

РЕГИОНАЛЬНЫЕ АТМОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОЙ УКРАИНЫ ПО ДАННЫМ БРИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ИНДИКАЦИИ А.В. Шабатура¹, О.Б. Блум², Ю.Г. Тютюнник^{2*}

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина;

² Национальный ботанический сад им. Н.Н. Гришко НАН Украины, Киев, Украина

* Эл. почта: yulian.tyutyunnik@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.02.2018; принята к печати 21.03.2018

Региональные атмогеохимические поля на территории Киевской и Житомирской областей (Украина) исследованы методом бриогеохимической индикации (с использованием мхов *Pleurozium schreberi* и *Brachythecium oedipodium*). Данные об уровнях атмогеохимической нагрузки на район исследований обрабатывались методом факторного анализа, что позволило сделать выводы о причинах ее формирования в разных природных и антропогенных условиях. Основными такими причинами являются следующие: (I) местное (локальное и региональное) загрязнение приземной атмосферы крупнодисперсными аэрозолями дезинтеграции природного и техногенного происхождения; (II) местное загрязнение приземной атмосферы мелкодисперсными пирогенными аэрозолями конденсации; (III) трансграничный перенос загрязненных воздушных масс с запада и, возможно, с севера; (IV) техногенное закисление и изменение рН–Еh баланса атмосферных осадков и гидрометеоров; (V) биологические процессы поглощения химических элементов мхами. Специфическими для обследованных районов факторами атмосферного загрязнения являются добыча и обогащение титановых руд в Житомирской области и возможный перенос калийсодержащих аэрозолей от галлургических производств Беларуси.

Ключевые слова: химический состав атмосферы, биогеохимическая индикация, факторный анализ, причины атмосферного загрязнения.

REGIONAL ATMOGEOCHEMICAL FIELDS BASED ON BRIOGEOCHEMICAL INDICATION DATA IN THE CENTRAL PART OF NORTHERN UKRAINE

A.V. Shabatura¹, O.B. Blum², Yu.G. Tyutyunnik^{2*}

¹ Kiev National Taras Shevchenko University, Kiev, Ukraine;

² M.M. Grishko National Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

* E-mail: yulian.tyutyunnik@gmail.com

Regional atmogeochemical fields in the territory of Kiev and Zhitomir Regions (Ukraine) were assessed using briogeochemical indication (elemental analysis of mosses *Pleurozium schreberi* and *Brachythecium oedipodium* in the present case). The data were treated using factor analysis to draw conclusion about the causes of formation of these fields under different environmental and anthropogenic conditions. The main causes are: (I) local (test plot-confined and regional) pollution of surface air with large-particle aerosols formed by disintegration of natural and anthropogenic matter; (II) local pollution of surface air with small-particle aerosols formed by condensation; (III) trans-border transfer of polluted air from the west and, probably the north; (IV) anthropogenic acidification and redox and pH misbalance in precipitates; and (V) biological assimilation of chemical elements by mosses. Air pollution factors specific for the regions under assessment are titan ore mining and processing in Zhitomir Region and, probably, potassium-containing aerosol transfer from halurgy plants in Belarus.

Key words: chemical composition of atmosphere, biogeochemical indication, factor analysis, causes of air pollution.

Введение

Биогеохимическая индикация – способ количественной оценки концентраций химических веществ и элементов в атмосферном воздухе по их содержанию во мхах. Считается, что элементный состав наземных мхов формируется под определяющим влиянием атмосферных выпадений, в частности, продуктов техногенеза и природной пыли, а также газов, и что между уровнями накопления химических элементов мхами и их усредненными концентрациями в воздухе устанавливается статистически достоверная корреляционная связь. Это дает основания использовать наземные мхи в качестве биогеохимических индикаторов загрязнения атмосферы. Сегодня они широко используются в биомониторинге и биоиндикации во многих странах, уже более 20 лет существует общеевропейская программа оценки и картирования состояния загрязнения приземной атмосферы континента на основе биогеохимической индикации [15]. В рамках этой программы выполнена настоящая работа.

Объекты и методы исследования

Выбор индикаторных видов мхов и способы отбора проб в полевых условиях подробно изложены в общеевропейских рекомендациях [16], и мы на этом вопросе останавливаться не будем. Отметим только некоторые важные особенности биогеохимической индикации в условиях зоны смешанных лесов (Полесье) и северной лесостепи Украины. Как показали наши исследования, из рекомендуемых европейскими методиками видов индикаторных мхов для северной части Украины подходит только вид *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. Встречаемость других рекомендуемых видов мала, и поэтому использовать их для индикационно-биогеохимических работ проблематично. Высокая встречаемость вида-индикатора в как можно большем числе разных биотопов – первейшее условие для успешного осуществления любых биоиндикационных работ. Опыт полевых исследований показал, что, кроме мха *P. schreberi*, в условиях северной лесостепи и Полесья Украины часто встречается также мох *Brachythecium oedipodium* (Mitt.) A. Jaeger. Его встречаемость выше в тех экотопах, где встречаемость *P. schreberi* снижается или он вообще отсутствует (это касается, в основном, лесостепных ландшафтов). Поэтому в настоящей работе мы использовали мхи видов *P. schreberi* и *B. oedipodium*. В биогеохимическом отношении, как будет показано ниже, *P. schreberi*

и *B. oedipodium* различаются сильно, поэтому точки отбора проб, где брали только мох *P. schreberi* или только мох *B. oedipodium*, сравнивать между собой нельзя, если предварительно не решена задача взаимной калибровки накопительных способностей разных групп мхов [12].

Исследования включали Киевскую и Житомирскую области, за вычетом Зоны отчуждения Чернобыльской АЭС на севере первой (рис. 1).

Пробы мхов не отбирались в населенных пунктах – местах локализации техногенеза. Однако они отбирались на их околицах и в окрестностях, и такие точки были отнесены к категории «зоны техногенеза». Пункты отбора проб, удаленные от каких бы то ни было источников выбросов, расположенные в природных или малоизмененных ландшафтах, были отнесены к категории «фон». Промежуточное положение имеет категория проб «полуфон». Строгой нормировки понятия «полуфон» нет, в литературе к подобным местам для характеристики состояния их антропогенного загрязнения иногда применяют такие определения, как «локальный фон», «местный фон», «антропогенный фон», «геотехнический фон» и др. В общем случае, эти территории воздействию локальных объектов техногенеза подвержены, но не непосредственно, а в распыленной, так сказать, форме, посредством более или менее выраженного атмосферного массопереноса. Формально строгих, однозначных и жестких критериев разделения территорий зон техногенеза и полуфона, полуфона и фона нет. В очевидных случаях их разграничение не составляет проблемы, но в «пограничных», нечетко определенных ситуациях вопросы могут возникать. Решать проблему помогают полевой опыт, знания и даже интуиция исследователя. Существенно облегчает решение проблемы также обращение к картографическому и метеорологическому материалу (если таковой на изучаемую территорию имеется).

Больше ясности, казалось бы, должно быть при отнесении точек отбора проб к природным зонам лесостепи и к Полесью. Но и здесь возникают трудности: старая проблема континуальности ландшафтных границ. Строгая линия отделяет Полесье от лесостепи только на карте, в реальности же граница между ними – это полоса в 20–25 км ширины, а в самых узких местах – в пределах Попельнянского и Андрушевского районов Житомирской обл. – 5–7 км. Куда отнести точку пробоотбора, если она попадает в эту

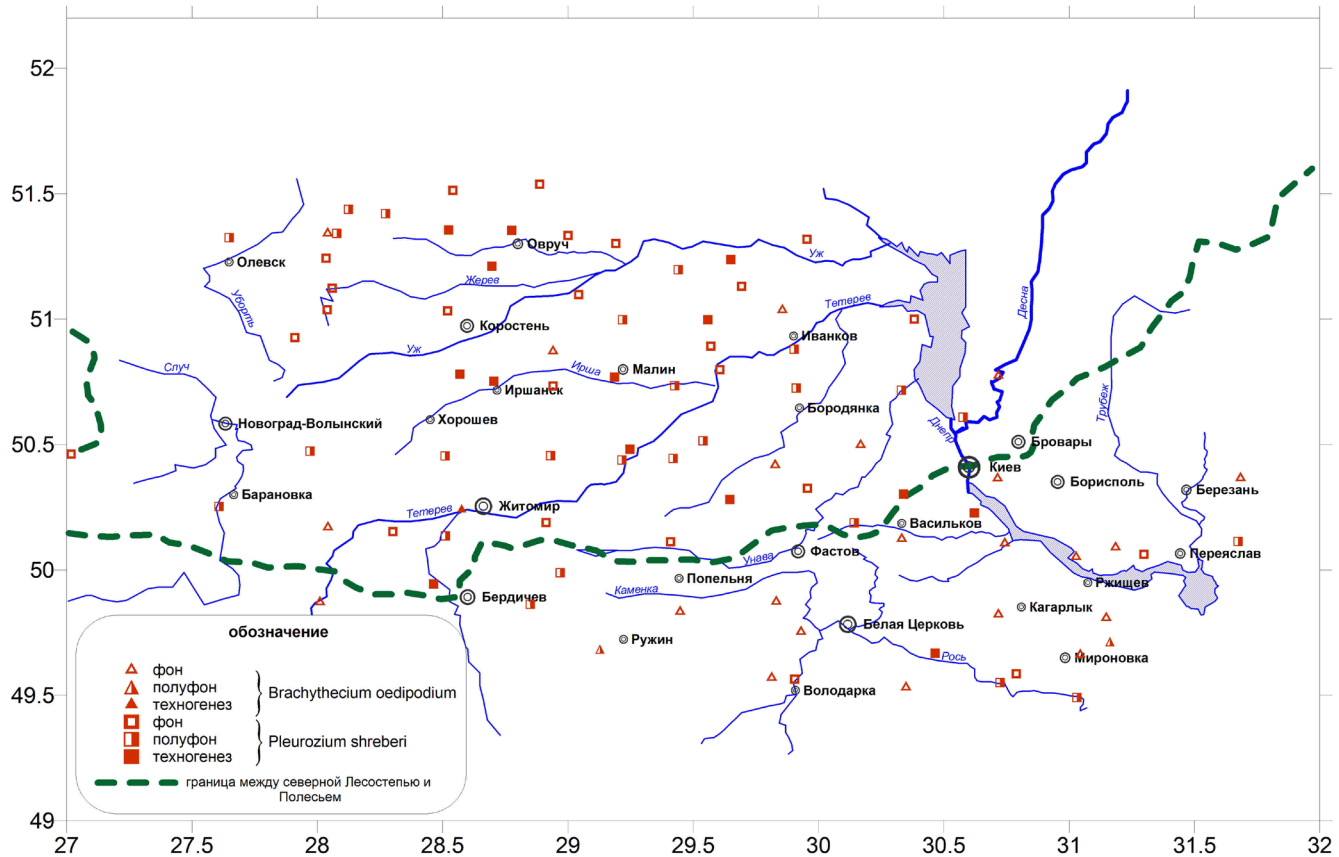


Рис. 1. Места отбора проб мха для исследования

полосу? Классические маркеры межзональной границы – четвертичные отложения, почвы и растительность в данном случае годятся только отчасти. Для нас самое важное – правильно учесть зональные особенности атмосферного массопереноса и климата. А эти характеристики территориально более расплывчаты, чем классические «полевые» параметры отделения лесостепи от Полесья.

Дополнительную трудность при определении принадлежности точки отбора проб к Полесью или лесостепи вносит Овручский кряж. Территориально он расположен целиком в Полесье, но изобилует типично лесостепными ландшафтами. Влияние последних на атмосферный массоперенос в региональном масштабе менее значительно, чем общих зональных условий на климат кряжа, поэтому все «овручские» точки отнесены к категории полесских, даже если они попадали в типичные для лесостепи овражно-балочные местности.

Отобранные в 92 пунктах образцы мхов подготовлены для анализа согласно указаниям в

[16]. Содержания химических элементов К, Са, Mg, S, Al, Mn, Fe, Na, P, Zn, Ba, Sr, Ti, В, Cu, Pb, Ni, Cr, V, Se, Co, Cd, Sb осуществляли методом плазменной эмиссионной спектроскопии на приборе ICAP 6300 (Thermo Fisher Inc., США). Данные о концентрациях химических элементов в пробах мхов обрабатывались методом факторного анализа, хорошо зарекомендовавшим себя в бриогеохимических индикационных исследованиях [4, 9, 13, 14, 17].

Результаты и обсуждение

Биогеохимические особенности мхов

Среднее содержание химических элементов в образцах мхов *P. schreberi* и *B. oedipodium* дано в табл. 1 (в ней также указаны численности проб мхов – общие и по категориям типологических группировок). Химические элементы в верхней строке расположены в ряд по убыванию концентраций в *P. schreberi*. Сравнивая его с рядом убывания концентраций для мха *B. oedipodium*, замечаем, что в интервалах

Табл. 1

Средние уровни (мкг/г воздушно-сухого веса) химических элементов в образцах мхов *Pleurozium schreberi* и *Brachythecium oedipodium*

Мхи	K	Ca	Mg	S	Al	Mn	Fe	Na	P	Zn	Ba	Sr	Ti	B	Cu	Pb	Ni	Cr	V	Se	Co	Cd	Sb
Вся выборка, 67 точек отбора проб																							
<i>P. schreberi</i>	7130	3690	1350	1330	846	635	607	513	455	34,3	24,1	21,1	21	17,0	12,9	4,3	3,4	3,1	2,1	0,58	0,45	0,32	0,21
Вся выборка, 25 точек отбора проб																							
<i>B. oedipodium</i>	9630	6540	2060	1930	1650	356	1180	293	971	49,1	43,8	33,3	31,7	23,0	12,4	3,6	3,6	3,8	5,0	0,26	0,76	0,33	0,19
Полесье, 48 точек отбора проб																							
<i>P. schreberi</i>	6890	3600	1310	1320	707	650	577	533	425	35,6	22,5	16,7	19,6	13,6	11,8	4,5	3,0	3,1	1,8	0,68	0,42	0,30	0,22
Лесостепь, 19 точек отбора проб																							
<i>P. schreberi</i>	7730	3910	1460	1350	1200	596	684	462	529	31,0	28,3	32,2	24,5	25,8	15,8	4,0	4,6	3,0	2,9	0,33	0,52	0,39	0,17
Фон, 25 точек отбора проб																							
<i>P. schreberi</i>	6770	3410	1250	1340	835	653	540	492	465	32,3	21,3	20,6	19,5	16,7	12,5	4,2	3,3	3,2	2,1	0,49	0,42	0,30	0,19
Полуфон, 27 точек отбора проб																							
<i>P. schreberi</i>	7500	3850	1450	1350	912	550	660	550	542	33,9	26,0	23,3	24,5	18,6	14,4	4,5	3,7	3,0	2,2	0,62	0,47	0,37	0,21
Зоны техногенеза, 15 точек отбора проб																							
<i>P. schreberi</i>	6960	3810	1330	1300	750	755	622	480	274	37,6	26,1	19,7	22,1	15,1	11,5	4,1	3,1	3,1	1,95	0,64	0,43	0,28	0,22

Mn–P и Cr–Cd эти ряды не совпадают. Другим важным отличием *B. oedipodium* от плеврозиума является более сильная их аккумулятивная способность: из 23 химических элементов для 17 средние концентрации в *B. oedipodium* выше таковых в *P. schreberi*, причем для Al и Fe это превышение достигает почти 2-кратного, а для V – почти в 2,4-кратного. Однако селен в *P. schreberi* накапливается в 2,2 раза интенсивнее, чем в *B. oedipodium*. Биогеохимические особенности брахитециумов и плеврозиума, подчеркнем еще раз, существенно отличаются, поэтому использовать их в качестве индикаторов можно только раздельно.

Сравнивая данные о содержании химических элементов во мхе *P. schreberi* по Полесью и лесостепи, видим, что Полесье в целом чище, что естественно, так как здесь меньше объектов техногенеза, чем на лесостепном юге Киевской и Житомирской областей. Однако содержание Mn, P, Na, Zn, Pb, Cr, Se и Sb все же выше в пробах мха с полесских ландшафтов; при этом Pb и Cr – типичные продукты техногенеза. В группе проб «зоны техногенеза» самые высокие концентрации найдены для Mn, Zn, Ba, Se, Sb, а вот у таких маркеров техногенеза, как Cr и V, наибольшие концентрации найдены в группе проб «фон». Наибольшее число химических элементов, имеющих наивысшие концентрации во мхе *P. schreberi*, – K, Ca, Mg, S, Al, Fe, Na, P, Sr, Ti, V, Cu, Pb, Ni, Co, Cd, свойственно группе проб «полуфон». Для того чтобы понять такое странное, на первый взгляд, распределение концентраций химических элементов в образцах мхов, обратимся к факторному анализу данных об их величинах.

Факторы и причины формирования атмогеохимических полей

Теоретические основы одного из самых старых и популярных способов анализа геостатистических данных подробно описаны в многочисленных публикациях. Вкратце: расшифровка действия и влияния факторов осуществляется путем интерпретации геохимических ассоциаций, образующихся по каждому из них. Сами же ассоциации химических элементов определяются по высоким значениям коэффицентов факторных нагрузок (КФН). Ранжирование факторов по силе и значению (F_1 , F_2 , F_3 ...) проводится по величинам дисперсии. В наших исследованиях не рассматривались факторы с дисперсией <5,0 для всей выборки проб (табл. 2) и <9,0 для меньших по объемам типологических выборок (табл. 3–4).

Во всех случаях КФН, который дает основание относить химический элемент к ассоциации, принимался не меньшим чем 0,7 (в таблицах эти КФН выделены полужирным). Но в отдельных случаях для интерпретации ассоциаций привлекались «вспомогательные» химические элементы – с КФН от 0,6 до 0,7. Важно также иметь в виду следующее: положительные значения КФН, которых большинство, свидетельствуют о том, что химические элементы накапливаются во мхах, а отрицательные, которых меньшинство, – об их вымывании из мхов. Интерпретация геохимических ассоциаций, которая и дает возможность предположить факторы, причины их формирования, основывается на: а) эмпирических данных, получаемых «в поле» (при этом важную роль играет полевой опыт исследователя); б) сведениях по феноменологии геохимии и биогеохимии химических элементов, которые применительно к целям настоящего исследования можно найти в [2, 5–7]; б) на сведениях и выводах, полученных в аналогичных исследованиях – индикационно-биогеохимических с привлечением факторного анализа и других геостатистических методах, которые были проведены в иных регионах нами и другими авторами [4, 9, 11, 13, 14, 17].

В табл. 2 представлены результаты факторного анализа по выборкам всех проб мхов *P. schreberi* и *B. oedipodium* (далее для краткости первую выборку будем обозначать PSH, вторую – BOE). Величина F_1 для выборок PSH и BOE – одна и та же, поскольку F_1 представлен одной и той же ассоциацией: Ca/Mg/Fe. В литературе ее обычно связывают с природной крупнодисперсной терригенной пылью. Мы придерживаемся того же мнения, но с одним уточнением: крупнодисперсная пыль, влияние которой отображается первым фактором, имеет не только терригенное и не только природное происхождение: в состав пыли входят также крупнодисперсные частички дезинтеграции, образующие при трении и коррозии металлических частей машин и механизмов (Fe) и при дезинтеграции строительных конструкций (Ca).

F_2 для выборок PSH и BOE отражает разные причины. С учетом характера формирующихся по F_2 геохимических ассоциаций – положительная V/Cu для PSH и отрицательная Cu/Pb для BOE – можно предположить следующее. F_2 в выборке PSH – фактор биогенеза, то есть всей суммы биогеохимических и биологических процессов, происходящих в растительном

Результаты факторного анализа по выборкам всех проб мхов *Pleurozium schreberi* (верхняя строка) и *Pleurozium schreberi* и *Brachythecium oedipodium* (нижняя строка), отобранных в Киевской и Житомирской областях, Украина («НУ» – «не учитывалось»)

Элементы	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇
К	0,53	-0,03	0,18	0,42	0,46	-0,15	-0,15
	0,12	-0,09	-0,08	0,12	-0,79	-0,04	НУ
Ca	0,92	0,08	0,03	0,03	0,05	0,08	-0,02
	0,76	0,12	0,30	0,02	0,17	-0,40	НУ
Mg	0,87	-0,15	0,17	0,07	0,06	-0,17	0,12
	0,77	-0,07	-0,08	0,16	0,22	-0,16	НУ
S	0,23	0,15	0,71	-0,12	0,15	-0,42	-0,10
	0,05	0,10	0,20	0,88	0,01	-0,06	НУ
Al	0,30	0,24	0,27	0,62	-0,06	0,03	-0,27
	0,67	0,07	0,31	-0,13	-0,07	0,15	НУ
Mn	-0,04	0,01	0,04	0,15	-0,01	0,07	-0,85
	-0,31	-0,01	-0,14	-0,03	-0,18	0,73	НУ
Fe	0,79	0,09	0,14	0,02	-0,25	0,03	-0,20
	0,80	0,07	0,46	0,01	0,19	-0,09	НУ
Na	0,64	-0,05	-0,01	-0,22	-0,01	0,53	0,23
	-0,03	0,01	-0,14	-0,55	-0,45	0,30	НУ
P	-0,11	0,13	0,10	-0,02	-0,03	-0,88	0,13
	0,45	0,17	-0,05	0,16	0,76	-0,02	НУ
Zn	0,15	-0,02	-0,17	-0,19	0,51	-0,12	-0,46
	-0,05	-0,36	-0,13	0,74	0,01	0,44	НУ
Ba	0,43	-0,18	0,70	0,24	-0,07	0,06	-0,13
	0,10	0,04	0,44	0,01	-0,14	0,56	НУ
Sr	-0,04	0,67	0,38	0,10	-0,20	-0,04	0,15
	0,11	0,21	0,36	0,18	0,72	-0,21	НУ
Ti	0,21	0,17	0,80	-0,09	-0,33	0,06	0,08
	0,16	0,13	0,66	0,00	0,12	-0,11	НУ
B	0,07	0,82	0,01	0,44	0,14	0,03	0,02
	0,24	-0,58	0,07	-0,11	0,59	-0,16	НУ
Cu	-0,04	0,87	-0,02	0,06	0,18	-0,05	-0,22
	-0,13	-0,88	-0,34	-0,07	0,12	-0,04	НУ
Pb	-0,16	0,21	-0,07	-0,09	0,83	0,17	0,03
	0,03	-0,78	0,27	0,05	-0,18	0,22	НУ

Ni	0,04	0,28	-0,08	0,85	-0,15	0,06	-0,05
	0,58	-0,19	0,25	-0,52	0,18	0,42	НУ
Cr	-0,31	-0,20	0,33	0,44	0,32	0,52	0,21
	0,19	0,03	0,76	-0,05	0,25	0,30	НУ
V	-0,12	0,23	0,89	0,15	0,03	-0,01	0,06
	0,13	-0,17	0,84	0,21	0,21	-0,08	НУ
Se	0,46	-0,02	-0,03	-0,66	0,20	0,15	-0,01
	-0,21	-0,57	-0,36	0,40	-0,22	0,17	НУ
Co	0,12	0,68	0,10	0,02	0,06	-0,28	0,11
	0,26	-0,23	0,31	0,03	0,78	-0,10	НУ
Cd	0,48	0,15	0,07	0,57	0,30	0,14	0,05
	0,04	0,67	-0,04	0,03	0,09	0,51	НУ
Sb	0,27	-0,55	-0,23	-0,13	0,47	-0,15	0,12
	0,54	0,46	-0,39	-0,26	-0,03	0,12	НУ
Дисперсия	21,3	16,6	10,7	9,4	7,2	6,6	5,1
	26,4	14,5	10,9	9,9	7,4	6,7	< 5,0

организме и определяющих биоаккумуляцию химических элементов мхами. Си и В являются типичными биогенными микроэлементами, связанными к тому же между собой эффектом синергизма [5]; «вспомогательный» Со с КФН 0,68 также относится к биогенным микроэлементам. Интерпретировать F_2 по выборке ВОЕ сложнее. Мы склоняемся к мысли, что здесь он отражает влияние тех центров техногенеза на обследованную территорию, которые находятся за ее пределами, то есть влияние трансграничного переноса загрязненных воздушных масс. Маркером последнего в региональных и глобальных масштабах является кадмий [10], КФН которого в нашем случае равен 0,67. А высокие отрицательные значения КФН для Си и Pb говорят о том, что эти элементы из мха *V. oedipodium* интенсивно вымываются. Это возможно в условиях закисления атмосферных осадков, а последнее на территориях, для которых интенсивный техногенез не характерен, обычно связывается с дальним атмосферным переносом – от территорий, где металлургия, теплоэнергетика, тяжелая химия хорошо развиты. В нашем случае это западный трансграничный перенос от промышленных узлов восточноевропейских стран (достоверно таковой

определен нами с помощью, опять-таки, бриогеохимической индикации, но с применением иных геостатистических методов, в работе [11]).

F_3 по обеим выборкам мы интерпретируем как влияние местных объектов техногенеза на обследованную территорию. Правда, мхи *P. schreberi* и *V. oedipodium* реагируют на них по-разному. Первые индицируют влияние более крупномасштабных процессов. В выборке PSH высокие КФН для S и Ti говорят о возможном влиянии теплоэнергетики (SO_2), что более характерно для Киевской области и разработок титановых руд в центральной части Житомирской обл. (Иршанское месторождение). Высоки значения КФН также для В и V. Барий, вероятно, тоже связан с горным производством, а ванадий – типичный элемент-маркер атмосферных выбросов отопительных систем, как централизованных (ТЭС), так и дисперсных (котельные, индивидуальное отопление). Он же имеет высокий КФН и в выборке ВОЕ; это – дополнительное свидетельство влияния выбросов отопительных систем. Титан в выборке ВОЕ имеет КФН 0,66, что является дополнительным, хотя статистически более слабым, подтверждением влияния горных титановых разработок на формирование атмогеохимического поля над Жи-

Табл. 3

Результаты факторного анализа образцов мха *Pleurozium schreberi*, сгруппированных по точкам отбора проб в полесской («П») и лесостепной («Л») частях Киевской и Житомирской областей, Украина

Элемент	F ₁		F ₂		F ₃		F ₄	
	П	Л	П	Л	П	Л	П	Л
K	0,26	0,88	0,22	0,02	0,10	0,18	0,05	-0,14
Ca	0,13	0,60	0,89	0,43	0,12	0,55	-0,11	-0,14
Mg	0,22	0,73	0,85	-0,10	0,01	0,22	-0,18	-0,46
S	0,79	0,22	0,15	-0,17	-0,29	0,28	0,23	-0,73
Al	0,28	0,74	0,17	-0,01	0,09	0,22	0,33	0,32
Mn	0,04	0,41	-0,11	0,13	-0,27	0,23	0,06	0,62
Fe	0,16	0,37	0,83	0,12	-0,10	0,66	0,03	-0,04
Na	-0,06	0,33	0,68	0,09	0,38	0,79	-0,04	0,07
P	0,27	-0,04	-0,23	0,10	-0,65	-0,45	0,12	-0,84
Zn	-0,15	0,38	0,05	0,43	-0,04	0,05	0,02	-0,04
Ba	0,76	0,44	0,37	-0,56	0,04	0,56	-0,07	0,10
Sr	0,56	-0,45	-0,02	0,25	-0,10	0,01	0,63	0,01
Ti	0,21	-0,40	0,17	-0,38	0,80	0,63	-0,09	-0,07
B	0,15	0,16	-0,19	0,86	0,26	0,19	0,80	0,08
Cu	-0,07	-0,04	-0,09	0,77	-0,24	0,20	0,88	0,05
Pb	-0,14	0,64	-0,34	0,44	0,25	0,10	0,38	0,21
Ni	-0,15	0,89	-0,15	0,30	0,34	-0,13	0,26	0,07
Cr	0,14	0,28	-0,44	-0,68	0,82	0,37	-0,04	0,18
V	0,87	-0,11	-0,16	-0,57	0,15	0,20	0,23	-0,28
Se	-0,03	-0,28	0,56	0,07	-0,12	0,68	0,09	0,13
Co	0,24	-0,13	0,07	0,67	0,04	0,04	0,66	-0,65
Cd	0,13	0,81	0,32	0,16	0,56	0,10	0,19	0,19
Sb	-0,21	0,87	0,13	-0,35	0,01	-0,15	-0,37	-0,02
Дисперсия	21,10	29,73	18,92	17,48	9,72	12,28	9,01	10,79

томирщиной. Высокое значение КФН для Sr в выборке ВОЕ говорит, по-видимому, также о влиянии теплоэнергетических выбросов: хром тоже может их маркировать, хотя и менее достоверно, чем V [2]. Хром может маркировать и некоторые другие пирогенные процессы, например литейное производство, которое обычно в небольших объемах всегда имеется на машиностроительных и ремонтно-механических заводах.

«Ассоциация» по F₄ в выборке PSH представлена одним никелем. Ранее, анализируя результаты биогеохимических лишеноиндикационных исследований в Киевском мегаполисе, мы

пришли к выводу, что в случае отсутствия на территории специфических производств, производящих и (или) использующих в больших объемах никель (например, цветной металлургии), накопление низшими растениями этого элемента из атмосферного воздуха можно интерпретировать как показатель влияния «обшегородской» гомогенизированной по составу загрязнителей воздушной массы, формирующейся над более или менее обширной урбанизированной территорией [1]. Полагаем, что и в обсуждаемом случае имеет место аналогичная причина: F₄ по выборке PSH отражает влияние на обследованную территорию тех воздушных

Табл. 4

Результаты факторного анализа выборок образцов мха *Pleurozium schreberi*, сгруппированных по точкам отбора проб, расположенных в разных условиях атмосферного загрязнения в Киевской и Житомирской областях, Украина (объяснения в тексте)

Элемент	F ₁			F ₂			F ₃			F ₄		
	фон	полуфон	ЗТЗ*	фон	полуфон	ЗТЗ*	фон	полуфон	ЗТЗ*	фон	полуфон	ЗТЗ*
K	-0,01	0,80	0,57	0,41	0,05	-0,30	0,15	-0,12	0,12	-0,12	0,12	0,36
Ca	-0,06	0,40	0,89	0,93	0,07	-0,07	0,10	0,05	-0,16	-0,02	0,15	0,04
Mg	0,19	0,54	0,87	0,82	-0,26	-0,30	-0,08	0,12	-0,12	-0,20	0,40	0,10
S	0,75	0,18	0,25	0,01	-0,03	-0,05	0,33	0,26	-0,20	-0,16	0,72	0,15
Al	0,28	0,82	0,38	0,24	0,14	0,51	0,35	0,12	0,50	0,55	-0,02	-0,16
Mn	-0,07	0,31	-0,05	-0,19	0,41	-0,05	-0,01	-0,14	0,05	0,14	-0,30	-0,37
Fe	0,11	0,28	0,77	0,67	-0,13	0,38	0,24	0,27	-0,08	0,42	0,20	-0,08
Na	0,03	-0,03	0,85	0,72	-0,13	-0,10	-0,08	0,06	0,03	-0,10	-0,33	0,10
P	0,16	-0,09	-0,10	-0,35	-0,01	0,05	0,13	0,02	-0,39	-0,14	0,84	0,44
Zn	-0,48	0,17	0,30	0,05	0,01	0,09	0,02	-0,74	-0,04	-0,22	0,16	0,43
Ba	0,77	0,57	0,33	0,36	-0,24	-0,01	-0,07	0,54	0,22	0,03	-0,03	0,03
Sr	0,61	0,11	-0,22	0,11	0,52	0,68	0,68	0,40	-0,19	0,03	0,23	-0,32
Ti	0,90	-0,07	0,23	0,19	0,01	0,52	0,10	0,87	0,01	0,12	0,06	-0,07
B	0,10	0,33	0,11	0,23	0,82	0,79	0,85	-0,19	0,40	0,26	0,05	0,01
Cu	-0,11	0,07	-0,03	-0,05	0,89	0,96	0,91	-0,13	0,03	-0,02	0,08	0,19
Pb	-0,20	-0,03	-0,08	-0,11	0,09	0,26	0,40	-0,70	0,08	-0,49	-0,22	0,91
Ni	-0,08	0,68	0,03	0,01	0,41	0,22	0,34	0,06	0,90	0,80	0,01	-0,24
Cr	0,36	0,30	-0,12	-0,17	-0,16	-0,09	-0,08	0,09	0,82	0,15	-0,70	0,39
V	0,89	0,25	-0,04	-0,02	0,18	0,28	0,21	0,57	0,10	0,03	0,11	-0,06
Se	-0,09	-0,31	0,54	0,16	-0,19	-0,05	0,13	-0,16	-0,67	-0,81	-0,06	0,20
Co	0,28	0,03	-0,12	0,12	0,52	0,70	0,69	-0,11	0,07	-0,12	0,62	0,13
Cd	0,13	0,71	0,63	0,63	0,10	0,17	0,27	-0,25	0,26	0,12	-0,35	0,07
Sb	-0,36	0,15	0,25	0,12	-0,77	-0,19	-0,54	-0,39	-0,15	-0,29	0,05	0,83
Дисперсия	25,3	19,0	26,8	13,9	18,8	19,4	10,96	14,4	10,94	9,9	11,3	10,1

* ЗТЗ: зона техногенного загрязнения.

масс, гомогенизированных по составу и концентрациям загрязняющих веществ, которые сформировались над такими крупными городами, как Киев, Белая Церковь, Борисполь, Фастов, Житомир, Бердичев, Коростень, Новоград-Волынский (они расположены в пределах обследованной территории). Что касается выборки ВОЕ, то здесь F₄ обозначен ассоциацией серы и цинка. Это – биогенные элементы; значит, F₄ для выборки ВОЕ – фактор биогенеза. Заметим, что он отличен от F₂ – тоже фактора биогенеза – для выборки PSH. В выборке ВОЕ этот фактор

проявляется в реакции растений на химические элементы не просто как на биогены как таковые (что имело место для F₂ в PSH), а как на биогенные элементы, которые одновременно являются и загрязнителями воздуха. Во всяком случае, для S – биогенного макроэлемента и одновременно компонента вредного для растений газа SO₂ – такое предположение логично.

Фактору F₅ по выборке ВОЕ дать удовлетворительную геохимическую интерпретацию трудно, а в выборке PSH он легко узнается как фактор влияния автомобильных выхлопов: сви-

нец, который является в этой выборке единственным и хорошо выраженным членом «ассоциации», в местах отсутствия специфических производств, производящих/использующих Pb, считается типичным маркером автомобильных выхлопов.

F_6 и F_7 отражают «тонкие» механизмы биогеохимических взаимодействий между мхами и воздушной средой. F_6 в выборке PSH обозначен вымыванием из фосфора мха. Снижение накопления растениями биогенов – эффект, хорошо известный в биогеохимии, – наблюдается в зонах высоких техногенных нагрузок и обусловлено тем, что в таких условиях на биохимическом уровне тормозится поглощение важных для жизнедеятельности химических элементов. То есть F_6 в выборке PSH можно трактовать и как влияние техногенеза, но опосредованное нарушением нормального протекания биохимических и биогеохимических процессов в растении. F_6 по выборке BOE и F_7 по выборке PSH интерпретируются как влияния, но разнонаправленные, параметров атмосферной влаги и гидрометеоров на мхи. Поливалентный ион марганца, чутко реагирующий на «сдвиги» окислительно-восстановительных (Eh) и кислотно-щелочных (pH) условий миграции, является хорошим маркером Eh–pH баланса жидких сред.

В табл. 3–4 представлены результаты факторного анализа, проведенного по типологическим группировкам проб мха *P. schreberi*, которые создавались путем их отнесения к полесским и лесостепным пунктам отбора проб (табл. 3) и к пунктам, в разной степени подверженным влиянию техногенеза: «фон», «полуфон», «зоны техногенеза» (табл. 4). Такой нехитрый прием, который ранее показал свою эффективность в практике бриогеохимической индикации атмосферного загрязнения [9], позволяет эмпирическим путем уже на стадии группирования точек отбора проб усилить роль одних факторов и снизить роль других. В связи с тем, что при группировке точек отбора проб произошло дробление исходного массива информации, что снижало достоверность результатов факторного анализа, последний ограничивался интерпретацией только первых 4 факторов, дисперсия которых была не менее чем 9,0; интерпретация остальных считалась мало достоверной и не осуществлялась.

Из табл. 3 видно, что Полесье и лесостепь в геохимическом отношении хорошо различаются, причем это различие касается не классической, хорошо изученной, строго локализован-

ной водной и почвенной миграции химических элементов, а куда более «расплывчатой» воздушной и куда менее зависимой от природных условий техногенной.

F_1 для лесостепных районов идентифицируется сложной и, на первый взгляд, малопонятной геохимической ассоциацией K/Mg/Al/Ni/Cd/Sb плюс «вспомогательные» Ca и Pb с КФН от 0,6 до 0,7. Эта ассоциация может отражать очень разные процессы атмосферного загрязнения. Но, если в нее внимательно всмотреться, то можно заметить, что все входящие в нее элементы-маркеры – это маркеры преимущественно сухих пыле-аэрозольных выпадений (разных фракций и разного происхождения). Маркеры влияния капельножидкой фазы – сера (SO_2 растворяется во влаге) и марганец (маркер Eh – pH жидких сред) – в лесостепной ассоциации по F_1 отсутствуют. Поэтому предположение, что основным фактором в более сухой и более распаханной лесостепи, имеющей к тому же более напряженный ветровой режим и большую концентрацию загрязняющих воздух объектов техногенеза, будет именно фактор общей сухой природно-техногенной пыле-аэрозольной нагрузки, представляется логичным. А вот в полесских пробах, отобранных в более влажных условиях, связанная с капельножидкой влагой сера в ассоциации по F_1 присутствует (S/Ba/V). Возможно, что и имеющийся в ассоциации барий как-то с нею связан. Что касается ванадия, то полесские населенные пункты хуже газифицированы и поэтому чаще отапливаются твердым топливом, а ванадий – типоморфный химический элемент для твердотопливных отопительных выбросов (сера тоже может быть их индикатором).

Если в лесостепи сухая пыле-аэрозольная нагрузка как фактор атмосферного загрязнения дневной поверхности стоит на первом месте, то в Полесье она перемещается на второе место и несколько «суживается», будучи представленной преимущественно крупнодисперсными аэрозолями дезинтеграции, которые хуже поглощаются капельножидкой фазой: F_2 для Полесья отражается ассоциацией Ca/Mg/Fe плюс Na с КФН 0,68. В лесостепи F_2 представлен ассоциацией биогенеза (B/Cu).

F_3 для Полесья (ассоциация Ti/Cr при вспомогательном значении P с отрицательным КФН –0,65), можно расшифровать как влияние местных процессов техногенеза через более или менее дальний атмосферный массоперенос. «Ассоциацию» для лесостепи по F_3 представляет только Na (при вспомогательной роли Fe и Ti). Этот фактор с небольшой степенью достовер-

ности тоже можно интерпретировать как влияние техногенеза в региональном масштабе, если сделать оговорку, что проявляет он себя лишь во фракции крупнодисперсных аэрозолей дезинтеграции.

Идентифицируемый по ассоциации В/Сu и «вспомогательному» Со F_4 для полесских проб очевидно является фактором биогенеза. А вот отрицательная ассоциация S/P с отрицательным же вспомогательным Со по F_4 для лесостепи на первый взгляд вообще интерпретации не поддается. Однако заметим, что вспомогательную роль здесь играет Mn с КФН 0,62. Это дает кое-какие основания предполагать, что мы сталкиваемся с влиянием Eh–pH условий осадков и гидрометеоров, испытывающих техногенное закисление. Оно, в свою очередь, способствует вымыванию S, P, Со из мхов, а это приводит к отрицательным КФН для S, P, Со по F_4 . Если это так, то можно утверждать, что фактор общей атмотехногенной нагрузки в лесостепи – F_1 как бы расщеплен на крупнодисперсную пылевую (F_3) и на капельножидкую «закислительную» (F_4) составляющие.

В табл. 4 представлены результаты факторного анализа выборок проб мха *P. schreberi*, отобранных в местах с разными условиями атмосферного загрязнения: в условиях фона, полуфона и зон техногенеза (см. выше).

В условиях фона F_1 представлен ассоциацией S/Ba/Ti/V. Она маркирует влияние процессов техногенеза, имеющих место в границах обследованной территории, которое осуществляется внутри нее путем воздушного массопереноса. F_2 представлен ассоциацией Ca/Mg/Na плюс «вспомогательный» Fe с КФН 0,67. Это – фактор влияния крупнодисперсной пыли преимущественно (но не полностью) терригенного происхождения. F_3 в условиях фона маркируется ассоциацией В/Сu, что мы интерпретируем как фактор биогенеза. F_4 отражается «ассоциацией», состоящей из Ni при высоком отрицательном КФН для Se. То же мы могли видеть выше по F_4 для всей выборки *P. schreberi* (табл. 2) с той лишь разницей, что там КФН со знаком минус для селена имел вспомогательное значение (–0,66). Очевидно, что и в случае фона F_4 объясняется воздействием воздушных масс, гомогенизированных по содержанию продуктов техногенеза, сформировавшихся над крупными населенными пунктами.

Если в условиях фона факторы влияния на накопление продуктов техногенеза во многом аналогичны таковым для всей выборки мха *P. schreberi*, то анализ данных по группе «полу-

фон» дает нам совсем другую картину. F_1 представлен более чем странной ассоциацией K/Al/Cd. Калий – типичный представитель биогенов, алюминий – литофилов, а халькофил кадмий, как говорилось, является маркером трансграничного переноса загрязненных воздушных масс издалека. В принципе, последним можно объяснить и всю ассоциацию K/Al/Cd, но с определенной региональной спецификой, а именно:

1) накопление алюминия связано с усиленным его поступлением в растения из-за закисления атмосферных осадков. Этот факт, а также высокие содержания металла во мхах установлены для условий Житомирской обл. [8];

2) калий в обследованные районы теоретически может поступать в составе пыли, образующейся в Солигорском горнопромышленном узле на территории Беларуси [3].

F_2 в выборке «полуфон» представлен ассоциацией В/Сu при одновременной сильной деконцентрации Sb. Это, так же как и F_2 для группы «фон», – фактор биогенеза, но опять же с особенностями: вымыванием сурьмы из мхов. Для КФН по F_3 мы затрудняемся дать удовлетворительное геохимическое объяснение. Не исключено, что F_3 в группе проб «полуфон» связан с каким-то весьма специфическим источником выбросов, обуславливающим резкое изменение Eh–pH параметров капельножидкой влаги, что приводит к вымыванию из Pb и Zn мхов. Плохо также интерпретируется F_4 , представленный ассоциацией S/P, «вспомогательным» Со (КФН 0,62), и Cr, который достоверно вымывается из мхов (КФН –0,70). Возможно, F_4 – это фактор какой-то «тонкой» биохимической природы, отражаемый химической конкуренцией между биогенными элементами (в особенности P) и вредным для растений Cr^{6+} .

Для группы «зоны техногенеза» отмечаем следующее. F_1 (Ca/Mg/Fe/Na) является фактором влияния крупнодисперсных аэрозолей дезинтеграции, причем роль таковых, имеющих техногенное происхождение, велика, если судить по большему КФН для железа. F_2 (В/Сu) – фактор биогенеза. F_3 (Ni/Cr) и F_4 (Pb/Sb), имеющие близкие величины дисперсии (10,9 и 10,1), что свидетельствует об их почти равных силах влияния, расшифровываются как факторы техногенеза. В случае F_3 – это влияние высоких источников атмосферных выбросов, в случае F_4 – влияние низких источников.

Выводы

1. В условиях Киевского и Житомирского Полесья, а также территорий северной лесостепи,

к ним примыкающих, эффективными биогеохимическими индикаторами содержания К, Са, Mg, S, Al, Mn, Fe, Na, P, Zn, Ba, Sr, Ti, В, Cu, Pb, Ni, Cr, V, Se, Co, Cd, Sb в атмосферном воздухе являются мхи *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и *Brachythecium oedipodium* (Mitt.) A. Jaeger. С их помощью дана оценка уровням содержания указанных химических элементов в пределах Киевской и Житомирской областей.

2. В атмогеохимическом и бриогеохимическом отношениях полесские и лесостепные ландшафты хорошо различаются между собой. Более или менее отчетливые различия наблюдаются также между территориями, которые относятся к категории «фон», «полупон» и «зоны техногенеза» (при этом категория «зоны техногенеза» не включает в себя урбанизированные, транспортные и промышленные ландшафты, а только зоны их влияния – окрестности).

3. Факторный анализ эффективен при применении в биогеохимических индикационных исследованиях загрязнения атмосферы. Он дает возможность выявить существенные причины, определяющие возникновение атмогеохимических полей, а также влияющие на процессы по-

глощения химических элементов мхами.

4. Основными такими причинами являются следующие: (I) местное (локальное и региональное) загрязнение приземной атмосферы крупнодисперсными аэрозолями дезинтеграции природного и техногенного происхождения; (II) местное загрязнение приземной атмосферы мелкодисперсными пирогенными аэрозолями конденсации; (III) трансграничный перенос загрязненных воздушных масс с запада и, возможно, с севера; (IV) техногенное закисление и изменение рН–Еh баланса атмосферных осадков и гидрометеоров; (V) биологические процессы поглощения химических элементов мхами.

5. Пространственная структура атмогеохимических полей определяется сложными комбинациями геохимических факторов и причин, нелинейно изменяющимися по территории. Специфическими для обследованных районов факторами атмосферного загрязнения являются добыча и обогащение титановых руд в Житомирской области и возможный перенос калийсодержащих аэрозолей от галлургических производств Беларуси.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Блюм ОБ, Тютюнник ЮГ. Изучение атмосферного загрязнения Ботанического сада НАН Украины методом тестовых трансплантантов. Биосфера. 2016;8:268-76.
2. Саєт ЮЕ, Ревич БА, Янин ЕП, Смирнова РС, Башаркевич ИЛ, Онищенко ТЛ, Павлова ЛН, Трефилова НЯ, Ачкасов АИ, Саркисян СШ. Геохимия окружающей среды. М.: Недра; 1990.
3. Жумарь ПВ. Геохимическая оценка техногенных ландшафтов Солигорского горнопромышленного района: Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Минск: БГУ; 2009.
4. Ермакова ЕВ, Фронтасьева МВ, Стейннес Э. Изучение атмосферных выпадений тяжелых металлов и других элементов на территории Тульской области с помощью метода мхов-биомониторов: Препринт Р14-2002-15. Дубна; 2002.
5. Кабата-Пендиас А, Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир; 1989.
6. Кист АА. Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент: Фан; 1987.
7. Ковалевский АЛ. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука; 1991.
8. Тютюнник СЮ, Ребенков СО, Орлов ОО, Долін ВВ. Форми знаходження алюмінію на фонових ділянках лісоболотних екосистем. Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. 2007;15:115-26.
9. Тютюнник ЮГ, Блюм ОБ, Шабатура АВ. Атмосферное загрязнение мышьяком и тяжелыми металлами Украинских Карпат и предгорных территорий. География и природные ресурсы. 2005;(1):138-46.
10. Тютюнник ЮГ, Блюм ОБ, Даунис-и-Эстаделья Дж, Мартин-Фернандес Дж-А. Оценка антропогенной нагрузки на дендропарк «Тростянец» НАН Украины методом биогеохимической индикации. Інтродукція рослин. 2015;(2):77-87.
11. Тютюнник ЮГ, Толосана-Дельгадо Р, Павловски-Глан В, Блюм ОБ. Тяжелые

металлы – индикаторы причин атмосферного загрязнения в Украинских Карпатах (геостатистический анализ). *Геоэкология*. 2006;5:433-9.

Общий список литературы/Reference List

1. Blum OB, Tyutyunnik YuG. [Using test transplants to study air pollution in the Botanic Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine]. *Biosfera*. 2016;8:268-76. (In Russ.)
2. Sayet YuYe, Revich BA, Yanin YeP, Smirnova RS, Basharkevich IL, Onischenko TL, Pavlova LN, Trefilova NYa, Achkasov AI, Sarkisyan SSh. *Geokhimiya Okruzhayushchey Sredy*. [Geochemistry of the Environment]. Moscow: Nedra; 1990. (In Russ.)
3. Zhumar PV. [Geochemical assessment of the anthropogenic landscapes of the Soligorsk mining region]. PhD Theses. Minsk: BGU; 2009. (In Russ.)
4. Yermakova EV, Frontasyeva MV, Steynnes E. [Study of atmospheric precipitation of heavy metals and other elements in Tula region using moss biomonitoring]. Preprint R14-2002-15. Dubna; 2002. (In Russ.)
5. Kabata-Pendias A, Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca-Raton; 2000.
6. Kist AA. *Fenomenologiya Biogeokhimi i Bioneorganicheskoy Khimii*. [Phenomenology of Biogeochemistry and Bio-Nonorganic Chemistry]. Tashkent: Fan; 1987. (In Russ.)
7. Kovalevsky AL. *Biogeokhimiya Rasteniy*. [Biogeochemistry of Plants]. Novosibirsk: Nauka; 1991. (In Russ.)
8. Tyutyunnik SYu, Rebenkov SO, Orlov OO, Dolin VV. [The forms of detected aluminum in the background areas of forest-bog ecosystems]. *Zbirnik Nukovikh Prats Institutu Geokhimi i Navkolishnyego Seredovischa* 2007;15:115-26. (In Ukr.)
9. Tyutyunnik YuG, Blum OB, Shabatura AV. [Atmospheric pollution of the Ukrainian Carpathians and foothill territories with arsenic and heavy metals]. *Geografiya i Prirodnye Resursy*. 2005;(1):138-46. (In Russ.)
10. Tyutyunnik YuG, Blum OB, Daunis-estadella J, Martin-Fernanes J-A. [Using biogeochemical indication to assess the anthropogenic load on “Trostanets” arboretum of Ukraine]. *Introduktsiya Roslin*. 2015;(2)77-87. (In Russ.)
11. Tyutyunnik YuG, Tolosana-Delgado R, Pavlovsky-Glahn V, Blum OB. [Heavy metals as indicators of the causes of atmospheric pollution in the Ukrainian Carpathians (geostatistical analysis)]. *Geokologiya*. 2006;5: 433-9. (In Russ.)
12. Blum O, Glebov A. Intercalibration of heavy metal accumulation in some indicator moss species as a basis for mapping atmospheric heavy metal deposition in Ukraine. *Biomonitoring of atmospheric pollution (with emphasis on trace on trace elements)*. BioMAP II. IAEA. 2003. P. 235-42.
13. Culicov OA, Frontasyeva MV, Steinnes E, Okina OS, Santa Z, Todoran R. Atmospheric deposition of heavy metal around the lead and copper-zinc smelters in Baia Mare, Romania, studies by the moss biomonitoring technique, neutron activation analysis and flame atomic absorption spectrometry. Preprint E-14-2002-102. Dubna; 2002.
14. Frontasyeva MV, Sminrov LI, Steinnes E, Lyapunov SM, Cherchintsev VD. A heavy metal atmospheric deposition study in the South Ural mountains. Preprint D14-2002-69. Dubna; 2002.
15. Harmens H, Norris DA, Sharps K, Mills G, Alber R, Aleksiyenak Y, Blum O, Cucu-Man S-M, Dam M, De Temmerman L, Ene A, Fernandez JA, Martinez-Abaigar J, Frontasyeva M, Godzik B, Jeran Z, Lazo P, Leblond S, Liiv S, Magnússon SH, Mankovski B, Pihl Karlsson G, Piispanen J, Poikolainen J, Santamaria JM, Skudnik M, Spiric Z, Stafilov T, Steinnes E, Stihl C, Suchara I, Thöni L, Todoran R, Yurukova L, Zechmeister HG. Heavy metal and nitrogen concentrations in mosses are declining across Europe whilst some “hotspots” remain in 2010. *Environ Pollut*. 2015;(200):93-104.
16. *Heavy Metals, Nitrogen and POPs in European Mosses: 2015 – Survey Monitoring Manual: International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops. Working Group on Effects Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, 2015.
17. Stain OA, Licaciu A, Frontasyeva MV and Steinnes E. New results from air pollution studies in Romania. *Radionuclides and Heavy Metals in Environment*. NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Series). Dordrecht: Springer; 2001.Vol.5:179-90.