

МОНИТОРИНГ СЛЕДОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ МЕТОДОМ НЕЙТРОННОГО АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА

А.Н. Журавлева^{1✉}, И.Л. Бухарина¹, В. Свозилик²,
М.В. Фронтасьева³, Е.А. Загребин¹

¹ФГБОУ ВО Удмуртский государственный университет, 426034, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Университетская, д. 1

²Лаборатория информационных технологий имени М.Г. Мещерякова, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

³Лаборатория нейтронной физики имени И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

zhuravleva_anastasija@mail.ru

Представлены результаты оценки степени загрязнения атмосферы на территории Удмуртской Республики методом мхов-биомониторов в сочетании с инструментальным нейтронно-активационным анализом. В образцах мха определены концентрации 37 макро-, микро- и следовых элементов. Рассчитаны факторы накопления отдельных элементов с помощью фоновых значений их концентраций. Фоновая концентрация определена путем нахождения трех минимальных значений и нахождения среднего с использованием методов описательной статистики. На основании аналитических результатов с помощью ГИС-технологий построены карты пространственного распределения тяжелых металлов и других токсичных элементов на исследуемой территории. Использован факторный анализ в качестве метода многомерного статистического анализа для выявления основных источников загрязнений — крупных промышленных объектов, расположенных на территории Удмуртской Республики. Настоящее исследование является продолжением работ для других регионов России с применением многоэлементного инструментального нейтронного активационного анализа и современных ГИС-технологий.

Ключевые слова: биомониторинг, мхи-биомониторы, загрязнение атмосферы, тяжелые металлы, нейтронный активационный анализ

Ссылка для цитирования: Журавлева А.Н., Бухарина И.Л., Свозилик В., Фронтасьева М.В., Загребин Е.А. Мониторинг следовых элементов на территории Удмуртской Республики методом нейтронного активационного анализа // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 54–61.
DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-54-61

Использование метода мхов-биомониторов уже на протяжении более 40 лет позволяет успешно проводить исследования атмосферных выпадений тяжелых металлов (ТМ) и следовых элементов в странах Восточной и Западной Европы [1–7]. В России этот метод был использован для определения атмосферных выпадений элементов на территории Ленинградской обл., Кольского п-ова, Карелии, в районе Южного Урала и в Центральной России [8–14].

Оценка состояния атмосферного воздуха требует многоэлементного анализа состава аэрозольных частиц и определения в них концентраций тех элементов, которые являются токсичными для живых организмов.

Единая методика, предложенная скандинавскими учеными — метод мхов-биомониторов с использованием видов мха, широко распространенных в странах с умеренным климатом, — позволяет проводить одновременный сбор мхов в различных странах Европы и России

с последующим анализом и прогнозом состояния атмосферного воздуха на обширных территориях. Мхи ввиду особенностей их строения представляют собой уникальные системы — аналоги аэрозольных фильтров, поэтому их элементный состав хорошо отражает состояние атмосферы. Они широко распространены, являются легкими и доступными объектами при проведении пробоотбора. Это определяет их универсальность и высокий интерес исследователей [1–3].

В рамках международной программы ООН «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе: оценка на основе анализа мхов-биомониторов» проводятся качественная и количественная оценки распределения региональных атмосферных выпадений ТМ в Европе, выделяются местоположения важных источников загрязнений и осуществляется ретроспективное сравнение с аналогичными результатами исследований, повторяющихся каждые 5 лет. К тому же каждые 5 лет на основе результатов анализа мхов-биомониторов под эгидой Комиссии ООН по трансграничному переносу атмосферных

выпадения в Европе (UNECE ICP Vegetation) издается Европейский атлас пространственных и временных тенденций накопления тяжелых металлов во мхах Европы (1990–2005) [15].

В России для решения проблем, связанных с изучением химического состава биосферы для понимания значения различных элементов в функционировании организмов и экосистем в условиях антропогенного воздействия, активно используются ядерно-физические методы, освоенные и развитые на радиоаналитическом комплексе в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна Московской обл. Инструментальный нейтронный активационный анализ (НАА) на импульсном быстром реакторе ИБР-2 позволяет определять концентрации более 40 элементов, и вследствие высокой чувствительности, точности, универсальности, возможности достижения низких пределов обнаружения при высокой информативности анализа с успехом используется для массового многоэлементного анализа мхов-биомониторов [8].

Цель работы

Цель работы — изучение атмосферных выпадений тяжелых металлов и токсичных элементов на территории Удмуртской Республики.

Материалы и методы

Описание изучаемой территории. Исследования проведены в пределах южной и центральной частей Удмуртской Республики. Климат изучаемых территорий — умеренно-континентальный. Средняя температура июля — 17 °С, января — –15 °С. Годовое количество осадков 500...600 мм. Преобладают суглинистые и дерново-подзолистые почвы. Удмуртская Республика расположена в пределах двух лесорастительных районов: в таежной зоне — южно-таежном районе европейской части Российской Федерации (северная часть) и зоне хвойно-широколиственных лесов — районе хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации (южная часть) [16].

Удмуртская Республика характеризуется развитой промышленностью и многоотраслевым сельскохозяйственным производством. В структуре промышленного производства важное место занимает лесная и деревообрабатывающая промышленность. К ведущим отраслям промышленности относятся: машиностроение, металлообработка, черная металлургия и деревообработка. Металлургическое производство сосредоточено в г. Ижевске, литейное производство — в городах Ижевске и Воткинске. Энергетика представлена комплексом тепловых электростанций в таких крупных городах, как Ижевск, Сарапул, Глазов

и Воткинск. Заготовки леса ведутся в северных и западных районах. Значительное количество предприятий связано с военно-промышленным комплексом России.

АО «Концерн «Калашников» — крупнейший российский производитель автоматического и высокоточного оружия, артиллерийских снарядов — производит 95 % всего стрелкового оружия. Приборостроительное предприятие оборонно-промышленного комплекса АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг» производит различные виды приборной техники. Предприятие оборонно-промышленного комплекса АО «Ижевский электромеханический завод «Купол» занимается производством систем противовоздушной обороны. Металлургический завод ПАО «Ижсталь» осуществляет производство стали, проволоки, поковок, штамповки, стальных фасонных профилей. Автомобилестроительное предприятие ООО «ЛАДА Ижевский Автомобильный Завод» выпускает легковые автомобили. Предприятие по переработке полимерного сырья АО «Ижевский завод пластмасс» производит физически сшитый пенополиэтилен и пенополиуретан. Камбарский машиностроительный завод — предприятие по производству техники для узкоколейных железных дорог.

Тем не менее, несмотря на обилие промышленных предприятий различной направленности, некоторые исследователи относят структуру атмосферных выбросов к газотранспортному типу с преобладанием предельных углеводородов [17].

При этом земли лесного фонда составляют по площади 2030 тыс. га, лесистость — 46,2 %. Незначительно преобладают хвойные насаждения (53 % общего запаса), в особенности сосредоточенные в северной части региона, среди которых по породному составу преобладает ель, формирующая высокопродуктивные ельники кисличного и черничного типов. В целом распределение лесной растительности на территории неравномерно. Насаждения изучаемых центрального и южного районов зачастую представляют собой небольшие смешанные лесные массивы с преобладанием лиственных пород — березы, осины, липы [18]. Всесторонние натурные исследования насаждений проводят относительно недавно, в рамках изучения деградации темнохвойных лесов и смены растительного сообщества [19–21]. Оценка аэрационного загрязнения тяжелыми металлами с использованием мхов и лишайников проводилась только локально, в частности на территории г. Ижевска [22–23].

Отбор проб и их подготовка к анализу. Для определения атмосферных выпадений ТМ и других следовых элементов на территории Удмуртской Республики была собрана коллекция из 26 образцов мхов-биомониторов видов *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi*.

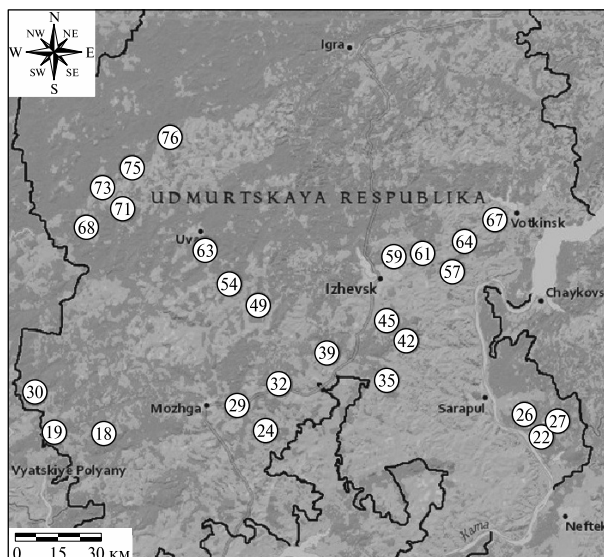


Рис. 1. Карта пробоотбора
Fig. 1. Sampling map

Пробоотбор проводили осенью 2016 г. в лесных экосистемах на территории девяти лесничеств — Селтинского, Сюмсинского, Увинского, Воткинского, Завьяловского, Яганского, Можгинского, Кизнерского и Камбарского в соответствии с общепринятой международной методикой [24] (рис. 1).

Для определения элементного состава атмосферных выпадений отбирали зеленые и зелено-коричневые сегменты мхов, соответствующие трехлетнему приросту. Мох тщательно очищали от постороннего мусора и остатков почвы. Затем высушивали в течение 48 ч при температуре 30...40 °С и прессовали без измельчения. Образцы массой 0,3 г упаковывали в полиэтилен для определения короткоживущих изотопов и в алюминиевую фольгу для определения долгоживущих изотопов [8].

Анализ. Инструментальный нейтронный активационный анализ (ИНАА) проводили на реакторе ИБР-2 лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) ОИЯИ с использованием пневмотранспортной установки РЕГАТА [25].

Для определения короткоживущих изотопов элементов Al, Cl, Ca, Ti, V, Mn образцы облучали в течение 3...5 мин в канале реактора с плотностью потока нейтронов $1,3 \cdot 10^{12}$ нейтрон/(см²·с). Наведенную гамма-активность облученных проб измеряли дважды: в течение 3...5 мин после 5...7 мин выдержки и 10...15 мин после 20 мин выдержки [8].

Для определения долгоживущих изотопов элементов Na, K, Sc, Cr, Fe, Co, Ni, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Tb, Hf, Ta, W, Au, Th, U образцы облучали около 4 сут в канале реактора с кадмиевым экраном и плотностью потока

Т а б л и ц а 1
Содержание элементов в образцах мха, мг/кг
Content of elements in moss samples, mg/kg

Элемент	Средняя концентрация	Min	Max	Фон
Na	529	129	2590	145
Mg	287	122	529	142
Al	2485	562	8830	709
Cl	401	125	2770	138
K	14742	8530	31300	9503
Ca	5110	1890	17900	2380
Sc	0,606	0,136	1,44	0,157
Ti	170,9	63,7	581	79,4
V	5,2	1,5	14	1,7
Cr	11,46	2,49	35,8	3,17
Mn	363	179	1260	185
Ni	6,1	1,62	23,6	2,1
Co	0,84	0,273	2,45	0,31
Fe	1585	418	5250	437
Zn	45,5	21,5	85,3	26,3
As	0,67	0,191	1,46	0,29
Se	0,24	0,15	0,365	0,16
Br	5,59	3,11	12,5	3,26
Sr	41,2	16,1	71,6	16,3
Rb	7,5	3,52	13,8	3,7
Sb	0,16	0,06	0,39	0,063
I	1,085	0,418	2,12	0,546
Ba	98	18,7	211	37
Cs	0,14	0,06	0,37	0,07
La	1,3	0,3	4,21	0,4
Ce	2,81	0,54	9,35	0,57
Sm	0,21	0,04	0,65	0,055
Tb	0,031	0,006	0,1	0,007
Dy	0,91	0,68	1,46	0,71
Yb	0,12	0,02	0,44	0,029
Tm	0,022	0,006	0,06	0,007
Hf	0,28	0,05	1,3	0,07
Ta	0,041	0,008	0,13	0,009
W	0,52	0,04	4,11	0,07
Au	0,002	0,0004	0,0071	0,001
Th	0,26	0,06	0,72	0,08
U	0,13	0,03	0,36	0,041

резонансных нейтронов $1,6 \cdot 10^{12}$ нейтрон/(см²·с). После облучения образцы для измерения переупаковывали в чистые контейнеры. Наведенную гамма-активность образцов измеряли дважды: спустя 4–5 дней после выгрузки из канала облучения в течение 45 мин и спустя 20 дней в течение 2,5–3 ч. Для обработки гамма-спектров и расчета концентраций элементов использовали пакет программ, разработанных в ЛНФ ОИЯИ. Погрешности определения концентраций для большинства элементов были в пределах 10–15 %, а при определении концентраций элементов на уровне чувствительности метода — 30 % и более (Co, Ni, Ba, Ta, W, Hg) [8].

Контроль качества. Качество анализа обеспечивалось с помощью сертифицированных эталонных материалов IAEA-Lichens-336 (лишайник, МАГАТЭ), NIST-Coal-1632b, NIST-Soil-2709, навески которых облучали в одинаковых условиях с исследуемыми образцами [8].

ГИС-технологии. Для наглядного представления аналитических данных и выявления источников пространственного распределения элементов использовали технологии географической информационной системы (ГИС) — пакет программ ArcGIS 13.1 для построения карт распределений изучаемых элементов.

Факторный анализ. Для выявления возможных источников происхождения элементов во мхах при обработке результатов НАА использовали метод многомерного статистического анализа — факторный анализ. Идея использования многомерного статистического анализа в работах, связанных с оценкой состояния окружающей среды, состоит в том, что корреляционные связи между множеством элементов, содержащихся во мхах, определяются существованием меньшего числа независимых факторов, в данном случае — источников загрязнения, которые характеризуются конкретным набором элементов [1]. Значения факторных нагрузок определяли с помощью программы Statistica 5.5.

Результаты и обсуждение

Результаты определения концентраций 37 элементов во мхах методом НАА представлены в табл. 1. Фоновую концентрацию определяли путем нахождения трех минимальных значений и нахождения среднего с использованием методов описательной статистики.

Как видно из полученных результатов, на исследуемой территории наблюдается следующая тенденция накопления элементов: Al > Fe > Ti > Zn > Sr > Cr > Rb > Ni > V > Ce > I > Co > As > W > Th > Se > Sb > Cs > U.

В целом в атмосферном воздухе по всей территории содержание большинства элементов по сравнению с фоновым повышенное, что, очевидно, связано с воздействием выбросов промышленных предприятий г. Ижевска.

Для выявления возможных источников загрязнения был применен факторный анализ. С помощью программы Statistica 5.5 было выделено четыре интегрирующих фактора (табл. 2). Применение факторного анализа позволяет выявлять и проводить сравнение уровней загрязнения.

Фактор 1 — «почвенный компонент» — Cr, Ni, Co, Fe, As, Sb, Cs, Th, U — отражает поступление элементов как в процессе выветривания поверхностного слоя земной коры и обработанных

Т а б л и ц а 2

Результаты факторного анализа

Factor analysis results

Элемент	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Na	0,27	0,91	-0,09	-0,02
Mg	0,27	0,87	0,14	0,29
Al	0,35	0,92	-0,05	-0,03
Cl	-0,05	0,04	0,08	0,95
K	-0,07	0,16	0,21	0,86
Ca	0,10	0,27	0,82	0,21
Sc	0,61	0,12	0,36	0,18
Tb	0,26	0,89	-0,19	-0,11
V	0,50	0,81	0,05	-0,06
Cr	0,77	0,47	0,33	0,04
Mn	-0,05	0,11	0,72	-0,12
Ni	0,84	0,26	0,27	-0,02
Co	0,84	0,32	0,32	-0,06
Fe	0,88	0,37	0,22	-0,04
Zn	0,08	-0,01	0,72	-0,08
As	0,72	0,21	-0,29	0,01
Se	0,25	-0,17	0,69	-0,10
Br	0,27	-0,02	0,80	0,26
Sr	0,37	0,64	0,46	0,17
Rb	0,14	-0,13	-0,25	0,74
Sb	0,70	-0,03	0,55	0,02
I	-0,60	0,45	0,14	0,01
Ba	0,06	0,62	0,54	0,08
Cs	0,91	0,32	0,09	0,03
W	0,32	-0,03	0,90	0,05
Th	0,87	0,44	0,16	0,01
U	0,83	0,39	0,32	0,02
Expl.Var	7,79	6,05	5,31	2,53
Prp.Totl	0,29	0,22	0,20	0,09

Примечание. Полу жирным шрифтом выделена высокая положительная связь фактора с элементом.

горных пород, так и в результате промышленной переработки топлива. Максимальные концентрации Fe, Cs, Th, U выявлены в биомассе мхов, собранных вблизи городов Ижевск и Камбарка.

Фактор 2 — «растительный фактор» — Na, Mg, Al, Ti, V — отражает поступление элементов, необходимых для протекания биохимических процессов и обеспечения жизнедеятельности мха.

Фактор 3 — «промышленное производство» — Ca, Mn, Zn, W, Br — отражает воздействие на атмосферный воздух промышленных выбросов. Значительные концентрации этих элементов характерны для пылевых выбросов машиностроительной и металлообрабатывающей отраслей промышленности. Атмосферные выпадения, Ca, Zn, Br и W локализованы в зоне радиусом 30...40 км вокруг Ижевска, где сосредоточены предприятия металлургии и металлообработки.

Фактор 4 — «добыча нерудных полезных ископаемых» — Cl, K, Rb — отражает воздействие на атмосферный воздух различных месторождений

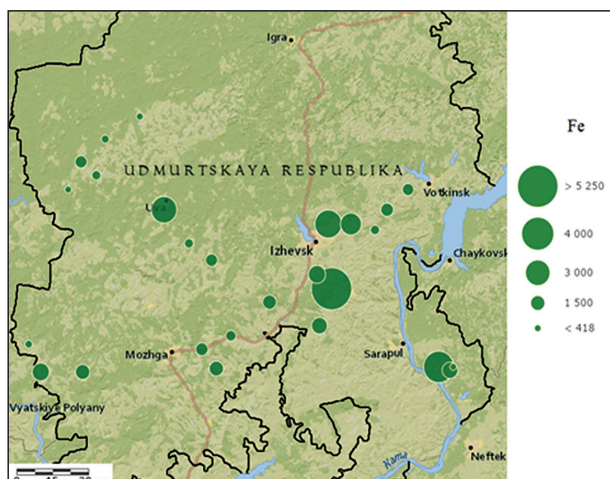


Рис. 2. Карта распределения содержания железа, относящегося к фактору 1
Fig. 2. Distribution map of the iron content related to factor 1

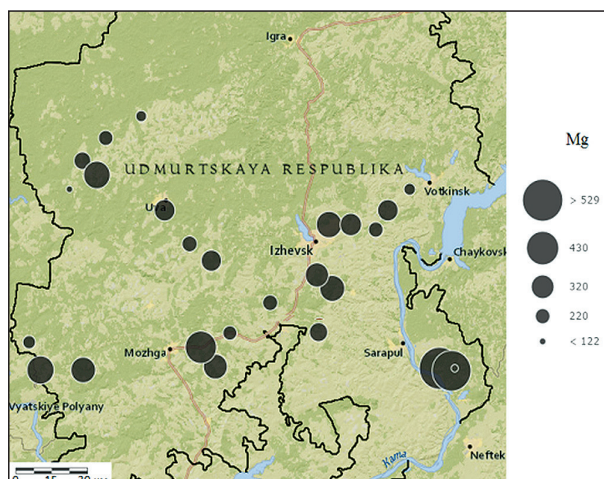


Рис. 3. Карта распределения содержания магния, относящегося к фактору 2
Fig. 3. Distribution map of magnesium content related to factor 2

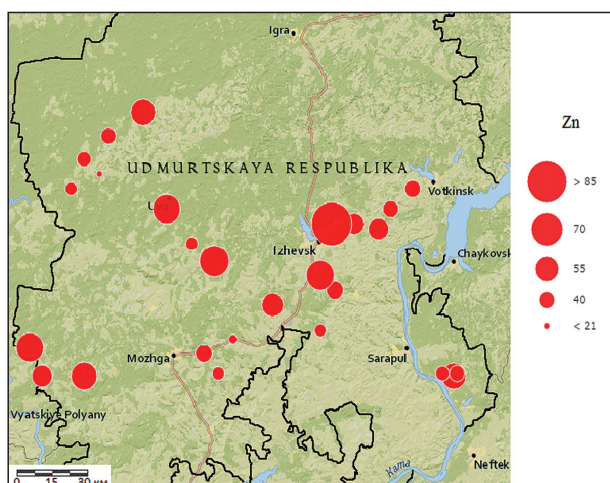


Рис. 4. Карта распределения содержания цинка, относящегося к фактору 3
Fig. 4. Distribution map of zinc content related to factor 3

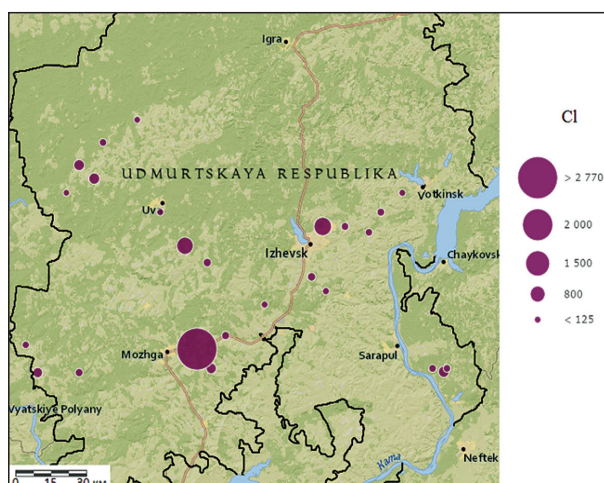


Рис. 5. Карта распределения содержания хлора, относящегося к фактору 4
Fig. 5. Distribution map of chlorine content related to factor 4

добычи нерудных полезных ископаемых (песка, известняка, глинистого сырья), а также выбросы в атмосферный воздух предприятий по производству строительных материалов.

Для визуальной интерпретации уровня загрязнений на изучаемой территории с помощью геостатистических методов (ГИС-технологий) были построены карты пространственного распределения содержания элементов, а также оценки факторов 1–4 (рис. 2–5).

Выводы

Проведенные исследования показали высокую информативность, пригодность ИНАА и метода мхов-биомониторов для исследования многоэлементного состава атмосферных выпадений на территории Удмуртской Республики. В ходе исследований было выявлено наличие очагов повышенных концентраций элементов, харак-

терных для металлургического производства и металлообработки. Концентрация 37 элементов, определенная в образцах мхов, использована для построения с помощью ГИС-технологий карт пространственного распределения элементов на исследуемой территории.

Показано, что степень загрязнения некоторыми элементами зоны, прилегающей к границам г. Ижевска, выше, чем на остальной части исследуемой территории. Именно в данной зоне отмечаются очаги повышенных концентраций элементов, характерных для металлургического производства и металлообработки.

В результате проведения факторного анализа выявлены 1–4 факторы поступления элементов в атмосферу. Основное поступление элементов обеспечивает фактор 1, отражающий естественные поверхностные процессы выветривания земных пород. Фактор 2 отражает поступление элементов,

необходимых для жизнедеятельности мха. Фактор 3 отражает вклад аэротехногенного загрязнения. Фактор 4 показывает влияние добычи нерудных полезных ископаемых на атмосферный воздух.

Полученные данные позволяют оценить экологическую ситуацию в центральной и южной частях Удмуртской Республики и могут служить основой для конкретных мероприятий по охране окружающей среды.

Список литературы

- [1] Rühling A. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe – estimations based on moss analysis. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1994, 9 p.
- [2] Berg T. Steinnes E. Use of mosses (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) as biomonitors of heavy metal deposition: from relative to absolute deposition values // *Environmental Pollution*, 1997, v. 98, no. 1, pp. 61–71.
- [3] Rühling A., Steinnes E. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe 1995.1996. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1998, 15 p.
- [4] Markert B., Breure A.M., Zechmeister H.G. Bioindicators and Biomonitors, Principles, Concepts and Applications. Amsterdam, Tokyo, NY: Elsevier, 2003, 997 p.
- [5] Markert B., Fraenzle S., Fomin A. Elements and Their Compounds in the Environment. Eds. E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoeppler. Weinheim; Tokyo; NY: Wiley-VCH, 2004, pp. 235–254.
- [6] Wolterbeek B. Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives // *Env. Pollution*, 2002, v. 120, pp. 11–21.
- [7] Markert B., Wünschmann S., Fraenzle S., Wappelhorst O. On the road from environmental biomonitoring to human health aspects: monitoring atmospheric heavy metal deposition by epiphytic/epigeic plants: present status and future needs // *Int. J. Environment and Pollution*, 2008, v. 32, no. 4, pp. 486–498.
- [8] Вергель К.Н., Горяйнова З.И., Вихрова И.В., Фронтасьева М.В. Метод мхов-биоиндикаторов и ГИС-технологии в оценке воздушных загрязнений промышленными предприятиями Тихвинского района Ленинградской области // *Экология урбанизированных территорий*, 2014. № 2. С. 92–101.
- [9] Смирнов Л.И., Фронтасьева М.В., Стейннес Э. Многомерный статистический анализ концентраций тяжелых металлов и радионуклидов во мхах и почве Южного Урала // *Атомная энергия*, 2004. Т. 97. Вып. 1. С. 68–74.
- [10] Ermakova E.V., Frontasyeva M.V., Pavlov S.S., Povtoreyko E.A., Steinnes E., Cheremisina Ye.N. Air pollution studies in Central Russia (Tver and Yaroslavl Regions) using the moss biomonitoring technique and neutron activation analysis // *J. of Atmospheric Chemistry*, 2004, v. 49, pp. 549–561.
- [11] Ермакова Е.В., Фронтасьева М.В., Стейннес Э. Изучение атмосферных выпадений тяжелых металлов и других элементов на территории Тульской области с помощью метода мхов-биоиндикаторов // *Экологическая химия*, 2004. Т. 13. Вып. 3. С. 167–180.
- [12] Pankratova Yu.S., Frontasyeva M.V., Berdnikov A.A., Pavlov S.S. Air pollution studies in the Republic of Udmurtia, Russian Federation, using moss biomonitoring and INAA. In Proceedings of Summer School «Nuclear Physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine-2007» / Eds. C. Granja, C. Leroy, I. Stekl // *AIP Conference Proceedings*, v. 958. New York: American Institute of Physics, 2007, p. 236–237.
- [13] Вергель К.Н., Фронтасьева М.В., Каманина И.З., Павлов С.С. Биомониторинг атмосферных выпадений тяжелых металлов на северо-востоке Московской области с помощью метода мхов-биоиндикаторов // *Экология урбанизированных территорий*, 2009. № 3. С. 88–95.
- [14] Панкратова Ю.С., Зельниченко Н.И., Фронтасьева М.В., Павлов С.С. Атмосферные загрязнения на территории Удмуртской Республики — оценки на основе анализа мхов-биоиндикаторов // *Проблемы региональной экологии*, 2009. № 1. С. 57–63.
- [15] European Atlas: Spatial and temporal trends in heavy metal accumulation in mosses in Europe (1990–2005), UNECE ICP Vegetation. Eds. H. Harmens, D. Norris. United Kingdom: Centre for Ecology & Hydrology, University of Wales Bangor, 2008, p. 51.
- [16] География Удмуртии: природные условия и ресурсы / под ред. И.И. Рысина. Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 2009. Ч. 1. 256 с.
- [17] Габдуллин В.М., Семакина А.В. Построение карты количественных характеристик загрязнения атмосферного воздуха (на примере Удмуртской Республики) // *Экология промышленного производства*, 2011. № 2. С. 21–26.
- [18] Об утверждении Лесного плана Удмуртской Республики. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553160573> (дата обращения 25.05.2021).
- [19] Ведерников К.Е., Бухарина И.Л., Загребин Е.А. Динамика и состояние еловых насаждений в Удмуртской Республике // *Лесохозяйственная информация*, 2020. № 3. С. 5–16.
- [20] Vedernikov K.E., Zagrebina E.A., Grigoriev R.A. The state of spruce stands in the Udmurt Republic // *J. of Agriculture and Environment*, 2020, no. 2 (14), pp. 1–8.
- [21] Бухарина И.Л., Пашкова А.С., Удалов Д.Н., Старков М.Н., Светлакова О.А., Белоусова О.А. Состояние еловых насаждений в районе южнотаежных лесов таежной зоны в Удмуртской Республике // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2021. Т. 25. № 4. С. 34–43. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-34-43
- [22] Константинова А.С. Содержание тяжелых металлов в талломах *Xanthoriaparietina* L. в условиях г. Ижевска // *I Никитинские чтения «Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах»: матер. Междунар. науч. конф. Пермь, 19–22 ноября 2019 г. Пермь: ИПЦ Прокрость, 2020. С. 252–255.*
- [23] Боброва А.В., Васильев А.А. Тяжелые металлы в почвах и мхах-эпифитах Ленинского района г. Ижевск // *АгроЭкоИнфо*, 2021. № 4. Статья 12.
- [24] Heavy metals in European mosses: 2010 survey monitoring manual // *International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops*. URL: http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/documents/UNECENE_AVYMETALSMOSSMANUAL2010POPsadartedfinal_220510_.pdf (дата обращения 10.09.2021).
- [25] Фронтасьева М.В., Павлов С.С. REGATA Experimental Setup for Air Pollution Studies // *Проблемы современной физики / под ред. А.Н. Сисакяна и В.И. Трубецкова. Дубна: Изд-во ОИЯИ, 1999. С. 152–158.*

Сведения об авторах

Журавлева Анастасия Николаевна[✉] — канд. биол. наук, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», zhuravleva_anastasija@mail.ru

Бухарина Ирина Леонидовна — д-р биол. наук, профессор, зав. кафедры инженерной защиты окружающей среды, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», buharin@udmlink.ru

Свозилек Владислав — PhD, Лаборатория информационных технологий имени М.Г. Мещерякова, Объединенный институт ядерных исследований, vladislav.svozilik@vsb.cz

Фронтасьева Марина Владимировна — канд. физ.-мат. наук, доцент, советник директора Лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, marina@nf.jinr.ru

Загребин Егор Александрович — ассистент кафедры инженерной защиты окружающей среды, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», i.am.yeti@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.12.2021.

Одобрено после рецензирования 14.01.2022.

Принята к публикации 11.05.2022.

TRACE ELEMENTS MONITORING IN UDMURT REPUBLIC BY NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS

A.N. Zhuravleva^{1✉}, I.L. Bukharina¹, V. Svozilik², M.V. Frontasyeva³, E.A. Zagrebina¹

¹Udmurt State University, 1, Universitetskaya st., 426034, Izhevsk, Udmurt Republic, Russia

²Information Technology Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research, 6, Joliot-Curie st., 141980, Dubna, Moscow reg., Russia

³I.M. Frank Neutron Physics Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research, 6, Joliot-Curie st., 141980, Dubna, Moscow reg., Russia

zhuravleva_anastasija@mail.ru

The results of the assessment of the degree of atmospheric pollution in the territory of the Udmurt republic by the method of moss biomonitors in combination with instrumental neutron activation analysis are presented. Concentrations of 37 macro-, micro- and trace elements were determined in moss samples. The factors of accumulation of individual elements are calculated using background values of their concentrations. The background concentration is determined by finding three minimum values and finding the average using descriptive statistics methods. Based on the analytical results, maps of the spatial distribution of heavy metals and other toxic elements in the study area were constructed using GIS technologies. Factor analysis was used as a method of multidimensional statistical analysis to identify the main sources of pollution — large industrial facilities located on the territory of the Udmurt Republic. This study is a continuation of work for other regions of Russia using multi-element instrumental neutron activation analysis and modern GIS technologies.

Keywords: biomonitors, moss-biomonitors, atmospheric pollution, heavy metals, neutron activation analysis

Suggested citation: Zhuravleva A.N., Bukharina I.L., Svozilik V., Frontasyeva M.V., Zagrebina E.A. *Monitoring sledovykh elementov na territorii Udmurtskoy Respubliki metodom neytronnogo aktivatsionnogo analiza* [Trace elements monitoring in Udmurt Republic by neutron activation analysis]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 54–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-54-61

References

- [1] Rühling A. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe — estimations based on moss analysis. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1994, 9 p.
- [2] Berg T., Steinnes E. Use of mosses (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) as biomonitors of heavy metal deposition: from relative to absolute deposition values // *Environmental Pollution*, 1997, v. 98, no. 1, pp. 61–71.
- [3] Rühling A., Steinnes E. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe 1995.1996. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1998, 15 p.
- [4] Markert B., Breure A.M., Zechmeister H.G. *Bioindicators and Biomonitors, Principles, Concepts and Applications*. Amsterdam, Tokyo, NY: Elsevier, 2003, 997 p.
- [5] Markert B., Fraenzle S., Fomin A. *Elements and Their Compounds in the Environment* / Eds. E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoeppler. Weinheim; Tokyo; NY: Wiley-VCH, 2004, pp. 235–254.
- [6] Wolterbeek B. *Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives*. *Env. Pollution*, 2002, v. 120, pp. 11–21.
- [7] Markert B., Wünschmann S., Fraenzle S., Wappelhorst O. On the road from environmental biomonitors to human health aspects: monitoring atmospheric heavy metal deposition by epiphytic/epigeic plants: present status and future needs. *Int. J. Environment and Pollution*, 2008, v. 32, no. 4, pp. 486–498.
- [8] Vergel' K.N., Goryaynova Z.I., Vikhrova I.V., Frontas'eva M.V. *Metod mkhov-biomonitorov i GIS-tehnologii v otsenke vozdukhnykh zagryazneniy promyshlennymi predpriyatiyami Tikhvinskogo rayona Leningradskoy oblasti* [The method of moss biomonitors and GIS technologies in the assessment of air pollution by industrial enterprises of the Tikhvin district of the Leningrad region]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy* [Ecology of Urbanized Territories], 2014, no. 2, pp. 92–101.

- [9] Smirnov L.I., Frontas'eva M.V., Steynnes E. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz kontsentratsiy tyazhelykh metallov i radionuklidov vo mkhakh i pochve Yuzhnogo Urala* [Multidimensional statistical analysis of heavy metals and radionuclides concentrations in mosses and soil of the Southern Urals]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2004, v. 97, iss. 1, pp. 68–74.
- [10] Ermakova E.V., Frontasyeva M.V., Pavlov S.S., Povtoreyko E.A., Steynnes E., Cheremisina Ye.N. Air pollution studies in Central Russia (Tver and Yaroslavl Regions) using the moss biomonitoring technique and neutron activation analysis. *J. of Atmospheric Chemistry*, 2004, v. 49, pp. 549–561.
- [11] Ermakova E.V., Frontas'eva M.V., Steynnes E. *Izuchenie atmosferykh выпадений tyazhelykh metallov i drugikh elementov na territorii Tul'skoy oblasti s pomoshch'yu metoda mkhov-biomonitorov* [Study of atmospheric precipitation of heavy metals and other elements on the territory of the Tula region using the moss-biomonitor method]. *Ecological Chemistry*, 2004, v. 13, iss. 3, pp. 167–180.
- [12] Pankratova Yu.S., Frontasyeva M.V., Berdnikov A.A., Pavlov S.S. Air pollution studies in the Republic of Udmurtia, Russian Federation, using moss biomonitoring and INAA. In *Proceedings of Summer School «Nuclear Physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine-2007»* / Eds. C. Granja, C. Leroy, I. Stekl. AIP Conference Proceedings, v. 958. New York: American Institute of Physics, 2007, p. 236–237.
- [13] Vergel' K.N., Frontas'eva M.V., Kamanina I.Z., Pavlov S.S. *Biomonitoring atmosferykh выпадений tyazhelykh metallov na severo-vostoke Moskovskoy oblasti s pomoshch'yu metoda mkhov-biomonitorov* [Biomonitoring of atmospheric precipitation of heavy metals in the north-east of the Moscow region using the moss-biomonitor method]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy* [Ecology of urbanized territories], 2009, no. 3, pp. 88–95.
- [14] Pankratova Yu.S., Zel'nichenko N.I., Frontas'eva M.V., Pavlov S.S. *Atmosfernye zagryazneniya na territorii Udmurtskoy Respubliki — otsenki na osnove analiza mkhov-biomonitorov* [Atmospheric pollution on the territory of the Udmurt Republic — estimates based on the analysis of moss biomonitors]. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of regional ecology], 2009, no. 1, pp. 57–63.
- [15] European Atlas: Spartial and temporal trends in heavy metal accumulation in mosses in Europe (1990-2005), UNECE ICP Vegetation/ Eds. H. Harmens, D. Norris. United Kingdom: Centre for Ecology & Hydrology; University of Wales Bangor, 2008, p. 51.
- [16] Geografiya Udmurtii: prirodnye usloviya i resursy [Geography of Udmurtia: natural conditions and resources]. Ed. I.I. Rysin. Izhevsk: Publ. House Udmurt University, 2009, part 1, 256 p.
- [17] Gabdullin V.M., Semakina A.V. *Postroenie karty kolichestvennykh kharakteristik zagryazneniya atmosfernogo vozdukh (na primere Udmurtskoy Respubliki)* [Construction of a map of quantitative characteristics of atmospheric air pollution (on the example of the Udmurt Republic)]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of Industrial Production], 2011, no. 2, pp. 21–26.
- [18] *Ob utverzhdenii Lesnogo plana Udmurtskoy Respubliki* [The Approval of the Forest Plan of the Udmurt Republic]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/553160573> (accessed 25.05.2021).
- [19] Vedernikov K.E., Bukharina I.L., Zagrebin E.A. *Dinamika i sostoyanie elovykh nasazhdeniy v Udmurtskoy Respublike* [Dynamics and condition of spruce plantations in the Udmurt Republic]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2020, no. 3, pp. 5–16.
- [20] Vedernikov K.E., Zagrebin E.A., Grigoriev R.A. The state of spruce stands in the Udmurt Republic. *J. of Agriculture and Environment*, 2020, no. 2 (14), pp. 1–8.
- [21] Bukharina I.L., Pashkova A.S., Udalov D.N., Starkov M.N., Svetlakova O.A., Belousova O.A. *Sostoyanie elovykh nasazhdeniy v rayone yuzhnotaehnykh lesov taezhnoy zony v Udmurtskoy Respublike* [State of spruce stands in Southern Taiga forests in Udmurt Republic Taiga Zone]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 34–43. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-34-43
- [22] Konstantinova A.S. *Soderzhanie tyazhelykh metallov v tallomakh Xanthoriparietina L. v usloviyakh g. Izhevsk* [The content of heavy metals in the thalloms of Xanthoriparietina L. in the conditions of Izhevsk]. I Nikitinskiye chteniya «Aktual'nye problemy pochvedeniya, agrokhimii i ekologii v prirodnykh i antropogennykh landshaftakh»: mater. Mezhdunar. nauch. konf. [I Nikitinsky readings «Actual problems of soil science, agrochemistry and ecology in natural and anthropogenic landscapes». Mater. International scientific conference]. Perm', 19–22 November 2019. Perm': IPTs Prokrost, 2020, pp. 252–255.
- [23] Bobrova A.V., Vasil'ev A.A. *Tyazhelye metally v pochvakh i mkhakh-epifitakh Leninskogo rayona g. Izhevsk* [Heavy metals in soils and moss-epiphytes of the Leninsky district of Izhevsk]. *AgroEcoInfo*, 2021, no. 4, article 12.
- [24] Heavy metals in European mosses: 2010 survey monitoring manual. International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops. Available at: http://icpvegetation.ceb.ac.uk/manuals/documents/UNECEHEAVYMETALSMOSSMANUAL2010POPSadaptedfinal_220510_.pdf (accessed 10.09.2021).
- [25] Frontasyeva M.V., Pavlov S.S., REGATA Experimental Setup for Air Pollution Studies. *Problems of modern physics*. Eds. A.N. Sisakian, V.I. Trubetskoy. Dubna: JINR, 1999, pp. 152–158.

Authors' information

Zhuravleva Anastasia Nikolaevna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Environmental Engineering, Udmurt State University, zhuravleva_anastasija@mail.ru

Bukharina Irina Leonidovna — Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Environmental Engineering, Udmurt State University, buharin@udmlink.ru

Svozik Vladislav — PhD, Meshcheryakov Information Technology Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research, vladislav.svozik@vsb.cz

Frontas'eva Marina Vladimirovna — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Advisor to the Director of the I.M. Frank Neutron Physics Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research, marina@nf.jinr.ru

Zagrebin Egor Aleksandrovich — Assistant of the Department of Environmental Engineering, Udmurt State University, i.am.yeti@yandex.ru

Received 03.12.2021.

Approved after review 14.01.2022.

Accepted for publication 11.05.2022.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
 The authors declare that there is no conflict of interest