
БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 57.04

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-4-7-21

Оценка ареала выпадения тяжелых металлов и радионуклидов на окружающую среду полигона бытовых отходов на 9-м км Вилюйского тракта в г. Якутске

С. Н. Мамаева¹ ✉, М. В. Фронтасьева², К. А. Петрова¹, В. Е. Колодезников¹,
Г. А. Игнатьева¹, Е. С. Захаров¹, В. Н. Кононов¹

¹Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

✉ sargylana_mamaeva@mail.ru

Аннотация. Впервые метод мхов-биоиндикаторов был использован для оценки ареала выпадений тяжелых металлов и других следовых элементов (Al, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, P, Pb, S, Sr, Sb, V, Zn и Hg) на территории, окружающей полигон бытовых (коммунальных) отходов на 9-м км Вилюйского тракта в г. Якутска в радиусе 150 км, с использованием метода оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Одновременно с этим был проведен анализ мхов, лишайника и почвы на содержание радионуклидов (^{40}K , ^{137}Cs , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{212}Bi , ^{214}Bi , ^{208}Tl , ^7Be , ^{228}Ac) в ряде отобранных проб методом полупроводниковой гамма-спектрометрии. Результаты исследования образцов мха методом оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой свидетельствуют о наличии на свалке большого количества токсичного бумажного (Ba) и металлического мусора (Al, Co, Cr, Fe, S, Pb). Кроме того, показано, что в исследуемых образцах обнаружены такие элементы, как: Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sr, V, Zn, Hg. Методом гамма-спектрометрии было выявлено, что в исследуемых образцах присутствуют радиоактивные элементы, такие как цезий ^{137}Cs , дочерние продукты урана ^{238}U и тория ^{232}Th . Обнаружение одинаковых тяжелых металлов и радионуклидов в атмосферной среде и почве города (данные из научно-технического отчета «Происхождение и состав пыли на территории МО г. Якутск»), а также в растительности, почве вблизи полигона (данные, представленные в настоящей работе) может указывать на то, что одним из источников загрязнения среды могут выступать продукты горения содержимого свалки на 9-м км Вилюйского тракта.

Ключевые слова: полигон бытовых отходов, мхи-биоиндикаторы, тяжелые металлы, радионуклиды, оптическая эмиссионная спектрометрия, гамма спектрометрия, дискриптивная статистика, экология, г. Якутск, Республика Саха (Якутия).

Для цитирования: Мамаева С. Н., Фронтасьева М. В., Петрова К. А., Колодезников В. Е., Игнатьева Г. А., Захаров Е. С., Кононов В. Н. Оценка ареала выпадения тяжелых металлов и радионуклидов на окружающую среду полигона бытовых отходов на 9-м км Вилюйского тракта в г. Якутске. *Вестник СВФУ*. 2024, Т. 21, № 4. С. 7–21. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-4-7-21

Estimation of heavy metals and radionuclides deposition area on the environment of the domestic waste landfill on the 9th km of Vilyuisky tract in Yakutsk

S. N. Mamaeva¹ ✉, M. V. Frontasyeva², K. A. Petrova¹, V. E. Kolodeznikov¹,
G. A. Ignatyeva¹, E. S. Zakharov¹, V. N. Kononov¹

¹M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

✉ sargylana_mamaeva@mail.ru

Abstract. The moss-biomonitor method was used for the first time to estimate the areal of precipitation extent of heavy metals and other trace elements (Al, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, P, Pb, S, Sr, Sb, V, Zn and Hg) in the territory surrounding the landfill of domestic (communal) waste on the 9th km of the Vilyuisky tract in Yakutsk within a radius of 150 km, using the method of optical emission spectrometry with inductively coupled plasma. At the same time, mosses, lichens and soil were analysed for the content of radionuclides (⁴⁰K, ¹³⁷Cs, ²¹²Pb, ²¹⁴Pb, ²¹²Bi, ²¹⁴Bi, ²⁰⁸Tl, ⁷Be, ²²⁸Ac) in a number of samples taken by semiconductor gamma spectrometry. The results of the study of moss samples by optical emission spectrometry with inductively coupled plasma indicate the presence of a large amount of toxic paper (Ba) and metal debris (Al, Co, Cr, Fe, S, Pb) in the landfill. In addition, it was shown that the following elements were found in the studied samples: Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sr, V, Zn, Hg. Gamma-ray spectrometry revealed that radioactive elements such as caesium ¹³⁷Cs, daughter products of uranium ²³⁸U and thorium ²³²Th are present in the studied samples. Detection of the same heavy metals and radionuclides in the atmospheric environment and town soil (data from the scientific and technical report “Origin and composition of dust on the territory of the Municipal Entity of Yakutsk”), as well as in vegetation and soil near the landfill (data presented in this paper) may indicate that one of the sources of environmental contamination may be the products of combustion resulting of the landfill contents at the 9th km of the Vilyuisky tract.

Keywords: domestic wastes landfill, biomonitor moss, heavy metals, radionuclides, optical emission spectrometry, gamma spectrometry, descriptive statistics, ecology, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia).

For citation: Mamaeva S. N., Frontasyeva M. V., Petrova K. A., Kolodeznikov V. E., Ignatyeva G. A., Zakharov E. S., Kononov V. N. Estimation of heavy metals and radionuclides deposition area on the environment of the domestic waste landfill on the 9th km of Vilyuisky tract in Yakutsk. *Vestnik of NEFU*. 2024, Vol. 21, No. 4. Pp. 7–21. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-4-7-21

Введение

Одним из важнейших аспектов в решении задач охраны окружающей среды и здоровья человека является контроль качества атмосферного воздуха. К наиболее опасным загрязнителям окружающей среды относятся тяжелые металлы (ТМ) и радионуклиды. В большинстве европейских стран потребность в изучении последствий их воздействия на окружающую среду и здоровье человека привела к созданию национальных и международных программ по биомониторингу атмосферных выпадений тяжелых металлов. Данные об атмосферных выпадениях ТМ и других токсичных элементов, а также радионуклидов собираются на основе анализа мхов-биомониторов, служащих аналогом аэрозольных фильтров [1].

Впервые метод биомониторинга со мхами был применен для оценки ареала воздействия полигона твердых бытовых (коммунальных) отходов (ТКО) на примере ТКО на 9-м км Вилуйского тракта в столице Республики Саха (Якутия) г. Якутске (рис. 1). Острой проблемой для города и его жителей является неудовлетворительное экологическое состояние, так как на его территории расположены жилищно-коммунальные, топливно-энергетические предприятия [2]. По данным [3], уровень загрязнения

атмосферного воздуха в г. Якутске оценивается как повышенный более чем в два раза. Приоритетными загрязняющими веществами атмосферного воздуха являются взвешенные вещества, оксид углерода, диоксид азота, бенз(а)прирен, диоксид серы [4].

В целом территория республики характеризуется существенными ограничениями для возможного размещения природоохранных объектов в сфере обращения с ТКО, такими как: вечная мерзлота, особо охраняемые природные территории (ООПТ), а также отсутствие расширенной сети автомобильных дорог. В рамках федеральной программы «Чистая страна» действующий полигон на 9-м км подлежит рекультивации после ввода в эксплуатацию нового полигона ТКО. По итогам проведенной проверки в декабре 2022 г. было установлено, что эта свалка переполнена, продолжает незаконно действовать, на ней размещаются запрещенные отходы, которые горят даже зимой, выделяя отравляющие вещества [5].

С законодательной точки зрения ТКО – это отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления, а также товары, которые утратили свои потребительские свойства в процессе их использования. К твердым коммунальным отходам также относятся отходы, образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, аналогичные по составу образующимся в жилых помещениях. Региональными операторами от населения вывозятся пищевые отходы и упаковки продуктов (стеклянная, деревянная, полимерная и т. п.), пакеты и смет из жилища, домашние растения и крупногабаритные отходы. К последним относятся пришедшие в негодность мебель, мелкая и крупная бытовая техника, электрические приборы за исключением ртутьсодержащих ламп [5].

В перечень видов принимаемых отходов на полигоне ТБК на 9-м км Вилуйского тракта, кроме бытовых, также входят лом различных металлов, отработанных ртутьсодержащих приборов (лампы, термометры, реле), картон и бумага, шины, покрышки, стеклянная тара, упаковка и пленка из полистирола, полиэтилена, полипропилена [6].

В ходе проверки было выявлено переполнение полигона отходами, которые продолжают накапливаться, что существенно превышает проектную вместимость полигона [6]. Немаловажной проблемой является и то, что в Якутске отсутствует отдельный сбор твердых бытовых отходов. Это приводит к особо негативным последствиям, так как при смешивании, например, бумаги, целлюлозы, тканей с пищевыми отходами, просроченными лекарствами, ртутьсодержащими изделиями, ядохимикатами и так далее образуются химические реакции с выделением различных опасных веществ, в том числе метана, аммиака, цианидов, соединений хлора и солей высокотоксичных тяжелых металлов (Cu, Pb, Sn, Zn, Co, Cd, Mo, Ni, Hg, Bi и Sb).

Опробованная методика биомониторинга со мхами позволила определить уровень атмосферных выпадений тяжелых металлов и других токсичных элементов, а также радионуклидов в зоне радиусом ~150 км и оценить их вклад в воздействие полигона на окружающую среду изучаемого региона.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны два вида мха: *Hylocomium splendens*, *Pleurozium Schreberi* и *Brachythecium salebrosum*, а также лишайники и почва.

Площадки пробоотбора были выбраны на 10-м, 27-м, 30-м, 51-м км по Вилуйскому тракту от г. Якутска. Следует отметить, что площадка на 27-м км – это площадь размещения нового полигона. На рис. 1 приведен общий вид свалки, которая находится на 9-м км. На рис. 2 представлена карта мест пробоотбора мхов-биомониторов, лишайников и почвы вдоль Вилуйского тракта.

Пробоотбор мхов-биомониторов (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium Schreberi* и *Brachythecium salebrosum*) проводили в соответствии с методикой UNECE ICP Vegetation [7]. Для определения элементного состава атмосферных выпадений отбирали зеленые и зелено-коричневые сегменты мхов, соответствующие трехлетнему приросту.



Рис. 1. Общий вид свалки, на котором отмечена начальная точка пробоотбора (10)
Fig. 1. General view of the landfill, where the initial sampling point is marked (10)

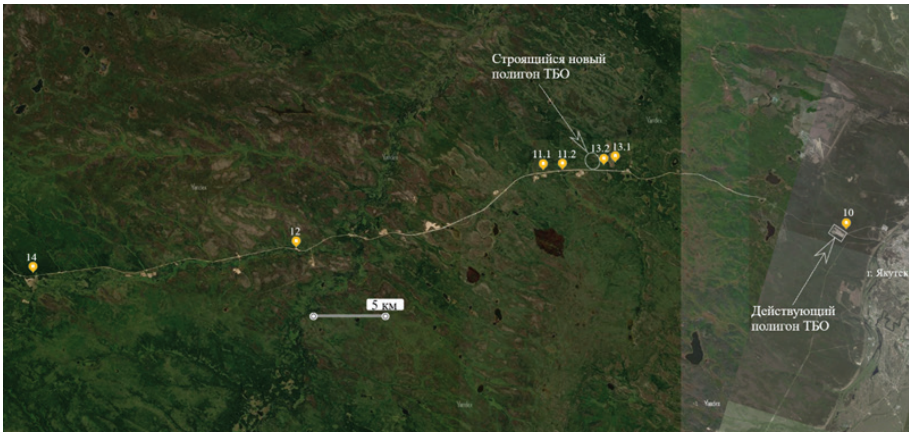


Рис. 2. Карта пробоотбора мхов-биомониторов и почв вдоль Вилуйского тракта
Fig. 2. Sampling map of moss biomonitors and soils along the Vilyuysky Tract



Hylocomium splendens



Pleurozium shreberi



Brachythecium salebrosum

Рис. 3. Виды мхов-биомониторов, произрастающих в районе пробоотбора
Fig. 3. Species of moss biomonitors growing in the sampling area



Рис. 4. Четыре годовых сегмента (прироста), которые используются в элементном анализе
Fig. 4. The four annual segments (increases) that are used in the elemental analysis

Мох тщательно очищали от постороннего мусора и остатков почвы. Очищенные образцы измельчали с помощью шаровой мельницы с агатовыми стаканами (планетарной мономельницы PULVERISETTE 6 classic line фирмы Fritsch), затем полученный материал сушился при температуре 40 °С до постоянной массы.

Определение элементного состава

Определение элементного состава образцов мхов проводили в лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований в г. Дубна методом оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС) PlasmaQuant PQ 9000 Elite (Analytik Jena, Германия) и прямом анализаторе ртути DMA-80 evo Milestone. На аналитических весах взвешивали 0,5 г мха и помещали в тefлоновый сосуд с 5 мл HNO₃ и 2 мл H₂O₂. Образцы минерализовали в микроволновой системе MARS6 (CEM, США). После минерализации растворы фильтровали через фильтровальную бумагу, переносили в калиброванные колбы емкостью 50 мл и

Таблица 1

Результаты анализа стандарта Virginia Tobacco Leaves [8]

Table 1

Results of analyzing the Virginia Tobacco Leaves standard [8]

Элемент	Концентрация	SD	Паспортные данные	Элемент	Концентрация	SD	Паспортные данные
Al	213,6	1,634	252	Ni	1,227	0,0167	1,49
Ba	41,66	0,2112	41,6	P	2898	21,46	2420
Cd	2,41	0,0169	2,23	Pb	0,7433	0,0366	0,972
Co	0,1502	0,0147	0,154	S	3886	87,79	3780
Cr	0,5721	0,0072	0,911	Sr	132	1,244	133
Cu	5,234	0,0464	5,12	V	0,3383	0,0115	0,405
Fe	267,9	5,904	258	Zn	47,47	0,4012	43,6
Mn	144,4	1,755	136				

доводили объем до метки деонизованной водой. Затем определяли содержание элементов с помощью ИСП-АЭС. Было определено 15 элементов: Al, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, P, Pb, S, Sr, V и Zn. Для определения ртути на аналитических весах взвешивали 50 мкг образца и помещали в никелевую кювету для последующего анализа на прямом анализаторе ртути.

Контроль качества анализа

Для контроля качества анализа использовали стандарт INCT-PVTL-6 (Табачные листья) [8].

Определение радионуклидов

Определение радиоактивных элементов в пробах мха, лишайника и почвы проводили в лаборатории «Радиационные технологии» Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова (СВФУ) в г. Якутске.

Измерения концентрации радионуклидов методом гамма-спектрометрии проводились без учета фоновых значений, но необходимо отметить, что в обсуждениях результатов данного исследования будут проводиться сравнения значений показателей концентрации радионуклидов в выбранных точках прооботбора с данными, полученными в исследованиях наличия радионуклидов в отдаленных от г. Якутска улусах. Для этого пробы мха, лишайника и почвы измеряли на полупроводниковом гамма-спектрометре «ORTEC» с детектором из особо чистого германия типа GEM-40 (ППД). Для достаточной степени достоверности измерений аппарат калибровали с помощью стандартных эталонов ^{241}Am и ^{152}Eu . Перед измерением образцы просушивали на воздухе при комнатной температуре в течении двух месяцев до постоянного веса. После просушки образцы мха и лишайника были озолены в муфельной печи при температуре 250 °C в течении 2–3 часов, затем измельчены до состояния однородного порошка. После измерения массы зола помещается в специальный сосуд «Denta». Радионуклидный состав подготовленных таким образом проб измеряется с помощью ППД в течении 8–16 часов.

Образцы почвы были высушены в течение двух месяцев на воздухе при комнатной температуре, затем очищены и измельчены до однородной массы. Содержание радиоактивных элементов в почве определяли с применением вышеуказанной методики на полупроводниковом спектрометре.

Анализ гамма-спектров проводили с использованием программного обеспечения Maestro32.

Результаты и их обсуждение

Дискриптивная статистика элементного состава

В табл. 2 представлены результаты дискриптивной статистики (среднее, стандартное отклонение, медиана, минимум, максимум и разброс данных для пяти измерений) значений концентрации элементов в образцах мха. В данной табл. приводятся статистические данные (среднее, стандартное отклонение, медиана, минимум, максимум и разброс данных), полученные в настоящем исследовании, и данные, полученные при исследовании мхов-биомониторов в Норвегии методом ИСП-ОЭС. Для анализа концентрации тяжелых металлов в мхах-биомониторах на территории вблизи г. Якутска были выбраны данные концентрации тяжелых металлов в мхах на территории Норвегии, т. к. для исследования элементного состава был использован один и тот же метод – метод ИСП-ОЭС. Кроме того, было решено использовать показатели по тяжелым металлам этой страны, т. к. данная европейская страна считается одним из экологически чистых регионов Европы.

Было проведено сравнение медиан значений концентрации элементов, которое показало, что имеется значительное превышение концентраций элементов в образцах мхов, собранных на территории вблизи полигона отходов г. Якутска, по сравнению со значениями медиан концентрации элементов в образцах мхов, собранных на территории Норвегии. Сравнение результатов дискриптивной статистики показывает, что

Таблица 2

Дискриптивная статистика концентрации тяжелых металлов в образцах мха (мг/кг)

Table 2

Descriptive statistics of the concentration of heavy metals in moss samples (mg/kg)

Элемент	Среднее	St. Dev.	Медиана	Разброс (Min-Max)	Норвегия [9] Медиана (разброс)
Al	686	392	567	366—1345	460 (100—3050)
Ba	55.2	16.9	58.0	28—71.5	25 (53—130)-
Cd	0.052	0.026	0.042	0.037—0.098	0.08 (0.02—1.33)
Co	0.32	0.11	0.32	0.19—0.47	0.2 (0.06—23)
Cr	1.35	0.90	1.05	0.72—2.93	0.7 (0.2—17)
Cu	3.42	1.89	2.77	2.04—6.7	4.2 (1.8—370)
Fe	527	367	413	280—1165	310 (78—8125)
Mn	337	213	287	86—668	400 (40—1660)
Ni	1.14	0.49	0.97	0.77—1.98	1.1 (0.4—550)
P	1842	268	1845	1538—2249	—
Pb	2.18	2.00	1.22	1.02—5.72	0.05 (0.001—0.4)
S	979	134	949	853.6—1128.5	820 (470—1860)
Sr	41	18	46	16.36—60.19	136 (3.8—60)
V	1.2	0.6	1.0	0.72—2.28	1.2 (0.3—14)
Zn	28	17	24	14.3—56.04	31 (8—409)
Hg	0.0282	0.0038	0.0264	0.0251—0.0339	0.05 (0.005—0.53)

наблюдается существенное различие в медианах концентрации для следующих элементов: алюминия Al (1,2 раза), бария Ba (в 2,3 раза), кобальта Co (1,6 раза), хрома Cr (1,5 раза), железа Fe (1,3 раза), серы S (в 1,2 раза) и свинца Pb (24 раза), что вполне соответствует тому, что на свалке находится большое количество бумажного (Ba) и металлического мусора (Al, Co, Cr, Fe, Pb).

Большой разброс норвежских данных объясняется географической протяженностью региона, максимальные значения соответствуют южной части, находящейся под воздействием дальнего атмосферного переноса загрязнителей из Западной Европы.

Из полученных результатов на территории свалки наблюдается следующая тенденция накопления исследованных элементов: $P > S > Al > Fe > Mn > Ba > Sr > Zn > Cu > Pb > Cr > V > Ni > Co > Cd > Hg$.

Как видно из табл. 2, сравнение медиан полученных значений содержания Ba, Cr, Fe и Pb превышает аналогичные значения для условно «чистой» территории Норвегии (при том, что на ее территории находится ферро-хромовый комбинат, которому соответствуют максимальные значения в разбросе данных работы [9]).

В качестве примеров на рис. 5 и 6 показано убывание концентрации свинца и железа в зависимости от расстояния между свалкой и точкой пробоотбора.

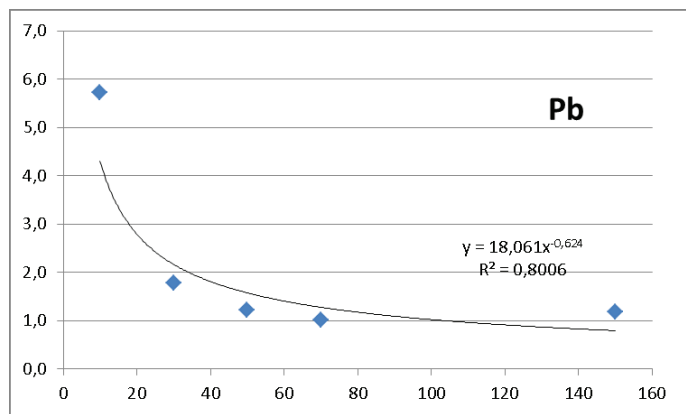


Рис. 5. Убывание концентрации свинца в образцах мха с расстоянием (км) от свалки
Fig. 5. Decreasing concentration of lead in moss with distance (km) from the landfill

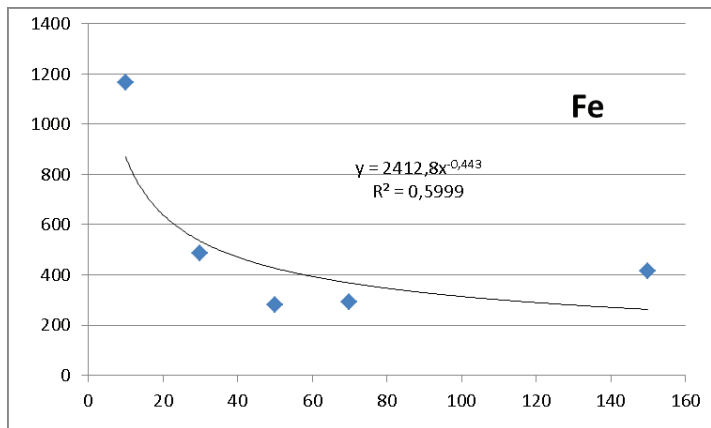


Рис. 6. Убывание концентрации железа в образцах мха с расстоянием (км) от свалки
Fig. 6. Decreasing concentration of iron in moss with distance (km) from the landfill

В табл. 3 представлены результаты корреляционного анализа исследуемых элементов. Наблюдаются парные корреляции практически для всех определенных металлов.

Таблица 3

Корреляционный анализ элементов, полученных для исследуемой территории

Table 3

Correlation analysis of elements obtained for the study area

	Al	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	P	Pb	S	Sr	V	Zn	Hg
Al	1,00															
Ba	0,37	1,00														
Cd	0,74	-0,08	1,00													
Co	0,70	0,42	0,55	1,00												
Cr	0,94	0,16	0,92	0,69	1,00											
Cu	0,50	-0,17	0,93	0,48	0,74	1,00										

Fe	0,95	0,19	0,90	0,71	0,99	0,71	1,00										
Mn	0,44	0,78	0,10	0,47	0,34	-0,08	0,33	1,00									
Ni	0,89	0,27	0,84	0,83	0,95	0,73	0,92	0,41	1,00								
P	-0,26	-0,25	0,11	-0,47	-0,16	0,32	-0,16	-0,63	-0,24	1,00							
Pb	0,77	-0,02	0,99	0,63	0,93	0,91	0,92	0,16	0,86	0,04	1,00						
S	0,41	0,02	0,55	0,13	0,44	0,54	0,46	-0,23	0,35	0,64	0,53	1,00					
Sr	-0,36	0,48	-0,38	-0,11	-0,45	-0,20	-0,41	0,02	-0,35	0,46	-0,35	0,32	1,00				
V	1,00	0,37	0,77	0,71	0,95	0,54	0,97	0,45	0,90	-0,25	0,81	0,39	-0,37	1,00			
Zn	0,60	-0,28	0,95	0,40	0,83	0,89	0,79	0,04	0,74	0,04	0,92	0,34	-0,57	0,64	1,00		
Hg	0,60	0,19	0,59	0,10	0,57	0,46	0,61	0,01	0,39	0,49	0,58	0,88	0,16	0,59	0,41	1,00	

Особо четкая корреляция с высоким коэффициентом корреляции прослеживается для таких металлов, как Fe-Cr, V-Ni, Hg-S, Pb-Cd, Fe-Pb, Cd-Cu.

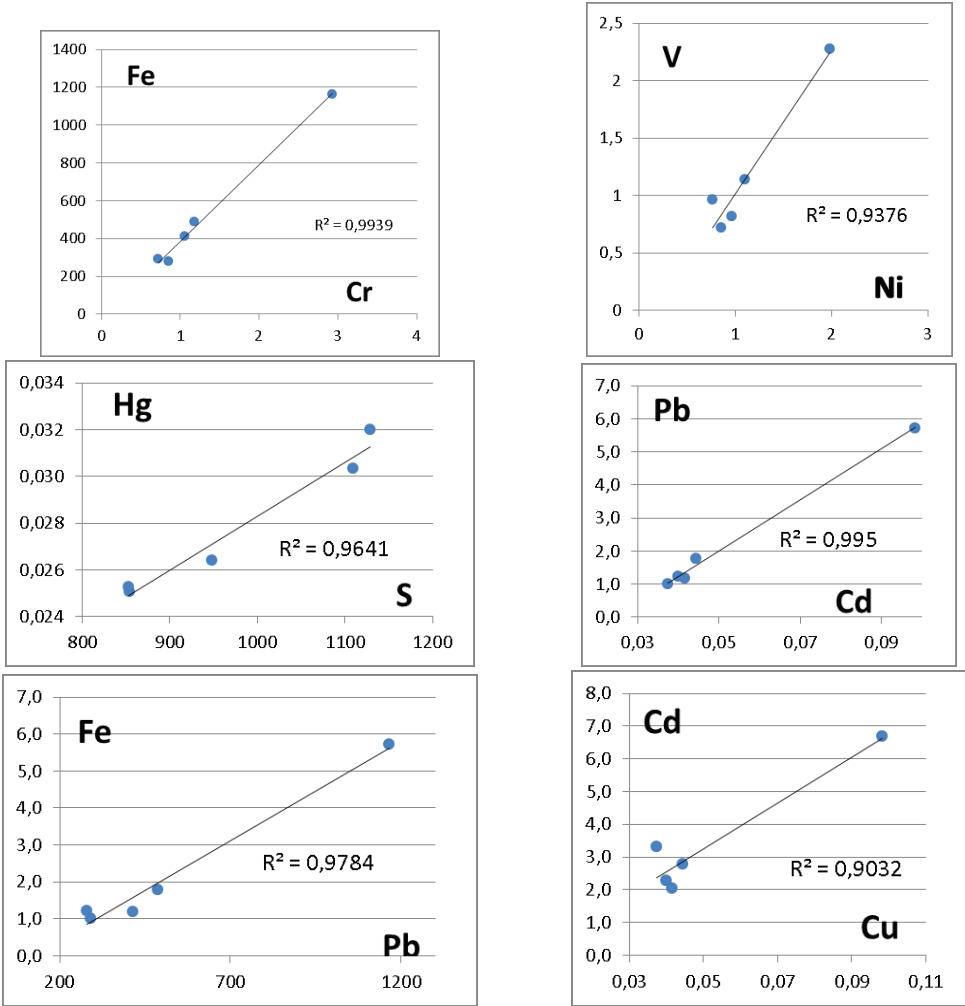


Рис. 7. Парные корреляции концентрации ряда определенных элементов
Fig. 7. Paired correlations of concentrations of a number of specific elements

Таблица 4

Удельная активность радионуклидов (Бк/кг) в образцах мха, лишайника и почвы, собранных на Вилуйском тракте

Table 4

Specific activity of radionuclides (Bq/kg) in moss, lichen and soil samples collected on the Vilyuisky tract

№	Образец	Вилуйский тракт	Удельная активность радионуклида, Бк/кг								
			⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	²⁰⁸ Tl	²¹² Bi	⁷ Be	²²⁸ Ac
1	Мох <i>Brachythecium salebrosum</i>	10 км	704,88±37,33	17,82±2,10	49,52±3,66	20,7±3,89	30,26±3,87	20,6±2,06	66,34±24,54	45,49±13,10	17,58±6,70
2	Мох <i>brachythecium salebrosum</i>	27 км	243,45±14,60	3,09±1,03	13,81±1,64	6,48±1,88	5,55±1,81	3,63±1,21			
3	Мох <i>brachythecium salebrosum</i>	30 км	424,95±29,75	55,92±3,35	37,63±3,50	19,09±4,01	25,48±3,77	11,89±2,30			
4	Мох <i>Hylocomium splendens</i>	51 км	342,56±18,84	63,06±2,27	17,89±1,91	10,76±2,27	10,65±2,15	6,20±1,20		37,80±9,26	
5	Лишайник <i>Cladonia rangiferina</i>	30 км	421,04±18,95	70,55±2,11	15,81±1,60	14,67±2,18	12,76±2,13	4,21±0,98		27,65±7,96	13,43±3,36
6	Почва	27 км	446,18±14,23	98,47±2,30	16,85±1,23	7,81±1,17	4,91±1,02	7,19±0,84			12,77±2,53
7	Почва	30 км	719,95±12,24	33,77±0,88	2,44±0,56	8,88±0,94	8,07±0,66	5,67±0,51	17,43±5,04		15,40±2,14
8	Почва	51 км	594,414±13,07	18,75±0,88	16,16±0,77	5,54±0,82	4,22±0,63	6,18±0,56	20,04±4,45		7,95±1,67

По результатам гамма-спектрометрического анализа (табл. 4) был обнаружен радионуклид ^{137}Cs во всех отобранных пробах. Наибольшее значение концентрации цезия показал образец почвы с 27-го км Вилюйского тракта, наименьшее значение получено в образце мха *Hyloconium splendens* с 10-го км Вилюйского тракта. Содержание радиоцезия в исследуемых образцах соответствует уровню глобальных выпадений и намного меньше допустимого уровня вмешательств (1000 Бк/кг). Также в пробах растительности обнаружен космогенный радионуклид ^7Be , наличие которого можно объяснить длительными осадками в период проведения отбора проб. В исследуемых образцах присутствуют радиоизотопы свинца ^{212}Pb , таллия ^{208}Tl , висмута ^{212}Bi и актиния ^{228}Ac – дочерние продукты радионуклида тория ^{223}Th . Кроме того, обнаружены изотопы свинца ^{214}Pb и висмута ^{214}Bi , являющиеся дочерними продуктами урана ^{238}U .

В исследованиях образцов почвенно-растительного покрова в местностях Лено-Амгинского междуречья и таежно-луговых ландшафтов бассейна р. Вилюй, проведенных в [10], было выявлено наличие ^{137}Cs в образцах мхов и лишайника. Диапазон значений концентрации данного радионуклида составлял от $1,3 \pm 0,3$ до $35,9 \pm 2,0$ Бк/кг в местах Лено-Амгинского междуречья и $21,2 \pm 1,2$ до $36,3 \pm 2,5$ Бк/кг на территории бассейна р. Вилюй.

Сравнение данных показателей с результатами нашего исследования свидетельствует о том, что в пробах образцов, собранных вдоль Вилюйского тракта, содержание (концентрация) радиоактивного цезия, диапазон значения которого варьирует от $3,09 \pm 1,03$ до $70,55 \pm 2,11$, значительно превышает диапазон данных исследования [10]. Такие показатели требуют дальнейшего исследования и проведения анализа данных для выявления источников загрязнения. Одним из источников загрязнения тяжелыми металлами и радионуклидами может выступить полигон по утилизации твердых бытовых отходов.

Полигон по утилизации твердых бытовых отходов на 9-м км Вилюйского тракта эксплуатируется с 1967 г. и является самой крупной среди свалок ТБО на территории ГО «Якутск» площадью 31,8242 га.

До начала XXI в. основными загрязнителями окружающей среды считались пыль, угарный и углекислый газы, оксиды серы и азота, углеводороды, соединения фосфора, ядохимикаты, радиоактивные изотопы, в то время как на содержание тяжелых металлов и их соединений не обращали должного внимания [11]. В настоящее время внимание исследователей в большей степени направлено на определение концентрации тяжелых металлов, например, в атмосферном воздухе. Загрязнение атмосферы повышенным количеством химических элементов, образующихся, например, при сгорании топлива и горения свалки происходит путем распространения их в виде взвешенных веществ (ВВ) (дым и пыль). Известно, что существует зависимость смертности от уровня ВВ в атмосферном воздухе [12]. По результатам элементных анализов проб пыли и растворимой фазы снежного покрова, проведенных Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения РАН, атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами было выявлено, что на территории г. Якутска загрязнение атмосферного воздуха ВВ больше в среднем в 2 раза по сравнению с санитарными нормами, а в снежном покрове обнаружены радионуклиды, такие как U и Th. Находящиеся в приземной атмосфере ВВ являются твердыми частицами разного размера. Средне-мелкодисперсные PM₁₀ (PM – “particulate matter”, цифра показывает содержание всех частиц диаметром 10 мкм) распределены наиболее равномерно, их количество в среднем составляет около 10% ВВ. На их поверхности адсорбируются токсичные вещества, PM₁₀ могут находиться во взвешенном состоянии несколько суток и переноситься на десятки-сотни километров. Эти частицы представляют наибольшую опасность, т. к. около 10% вдыхаемых пылинок могут проникать в глубокие отделы легких (альвеолы) и задерживаться там, а 15% заглатываются со слюной [6]. По результатам исследования атмосферная пыль г. Якутска содержит большое количество серы, оксидов кальция,

натрия и железа, и незначительное количество оксидов фосфора, титана, марганца, калия и алюминия [6]. Отмечено, что в пыли также присутствуют элементы третьего (Ba, V, W, Mn, Sr), второго (B, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr) и первого (As, Cd, Hg, Pb, Zn) классов токсичности. В отчете этой работы, проведенной в 2020 г., в приземной атмосфере Якутска в крупных частицах PM₁₀₋₁₀₀ обнаружены накопления элементов Zn, Mn, Co, Ti, Ni, Ga, Sr, Zr, Sn, La. Было выявлено, что концентрация Zn, Mn превышает предельно допустимые значения в почве. Частицы PM_{<10} содержат Cu, Cd, Pb, Be, Y, Sc, Cr, где содержание металлов Cu, Cd, Pb также превышает допустимые значения в почве. Кроме того, было обнаружено, что в атмосферной пыли города распространены радионуклиды.

Выявленные в данной работе тяжелые металлы и радионуклиды в образцах мхов, лишайника и почвы подтверждают результаты исследования атмосферного воздуха г. Якутска [6]. Показано, что концентрация некоторых тяжелых металлов в образцах мха превышает предельно допустимые значения концентрации (ПДК) в почве, что свидетельствует о том, что в почве местностей, с которых был собран мох, концентрация тяжелых металлов еще выше [13].

По данным настоящего исследования также обнаружены тяжелые металлы: хром Cr (концентрация выше, чем ПДК), никель Ni и цинк Zn (концентрация выше, чем ПДК), которые встречаются на промышленных площадках горно-обогатительных компаний (ГОК). Из недавних работ известно, что в результате деятельности горнодобывающих предприятий в близлежащих местностях наблюдается увеличение содержания тяжелых металлов в почве и растительности. Кустарники, произрастающие на территории промышленной площадки Удачинского ГОКа (Якутия, Россия), накапливают высокие уровни тяжелых металлов, а именно Cr, Ni и Zn [14], т. е. на территории, в котором отсутствуют промышленные предприятия, также могут быть обнаружены высокого уровня концентрации видов тяжелых металлов, встречающиеся при эксплуатации ГОКа.

Кроме того, результаты настоящего исследования могут быть подтверждены данными Роскомнадзора 2020 г. На данной свалке всего было размещено 460 000 тонн отходов, при установленной проектной вместимости 450 000 тонн, то есть полигон ТКО был переполнен уже 2020 г., а по состоянию на конец 2021 г. переполнение отходов составило уже 135 178,3 тонны, и они продолжают накапливаться [5]. В результате тления (горения) отходов в отобранных пробах атмосферного воздуха установлено превышение содержания диоксида серы SO₂ для городских и сельских поселений почти в 10 раз. Наряду с этим установлены факты незаконного приема и захоронения на свалке запрещенных отходов, таких как оргтехника, бытовые приборы (мониторы, телевизоры, компьютеры, картриджи, холодильники, микроволновки и т. д.), покрышки, черный и цветной металл и т. д., также отходы, подлежащие утилизации (бумага, картон, полимерные материалы, металлы и т. д.), в состав которых входят тяжелые металлы и другие токсичные вещества.

Заключение

В результате исследования образцов мха методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на свалке находится большое количество бумажного (Ba) и металлического мусора (Cr, Fe, Pb). Сравнение медиан значений содержания Ba, Cr, Fe и Pb показывает, что они превышают аналогичные значения для условно «чистой» территории Норвегии. Таким образом, результаты данной работы, свидетельствующие о присутствии бария (Ba – элемент третьего класса токсичности), свинца (Pb – элемент первого класса токсичности), хрома (Cr (VI) – токсичная форма хрома), подтверждают результаты ранее проведенного исследования атмосферы и почвы г. Якутска [6]. Кроме того, высокие значения концентрации таких тяжелых металлов в образцах мха на близлежащих от города территориях (вблизи свалки) сопоставимы со значениями концентрации тяжелых металлов в образцах растительности с мест, находящихся вблизи, например, промышленных площадок горно-обогатительных комбинатов [14].

Сравнение результатов определения наличия тяжелых металлов в мхах, собранных на Вилюйском тракте, методом ИСП-ОЭС и с применением прямого анализатора ртути, а также атмосферного воздуха г. Якутска показало, что в объектах исследования обнаружены такие элементы, как Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sr, V, Zn, Hg [6]. А при сравнении данных радионуклидного анализа мхов, лишайника, почвы, полученных методом гамма-спектрометрии в данной работе, и снежного покрова г. Якутска [6] было выявлено, что в исследуемых образцах присутствуют одни и те же радиоактивные элементы: дочерние радиоизотопы урана и тория. Обнаружение одинаковых тяжелых металлов и радионуклидов в атмосферной среде, почве города и в растительности, почве вблизи полигона может указывать, что одним из источников загрязнения среды могут выступать продукты горения содержимого свалки на 9-м км по Вилюйскому тракту.

В ближайшие годы планируется начало эксплуатации нового мусорного полигона г. Якутска на участке площадью 46 гектаров на 27-м км Вилюйского тракта. Полигон начнет принимать мусор, как только заработает мусороперегрузочная станция на 8-м километре Вилюйского тракта [15]. В данной работе одной из точек пробоотбора является 27-й км по Вилюйскому тракту. Результаты, полученные из образцов, собранных в этой местности, могут быть полезными при подготовке и эксплуатации нового полигона ТБО: могут служить фоновыми данными для проведения аналогичных исследований для будущего мониторинга воздействия полигона на окружающую среду вблизи этой местности.

Л и т е р а т у р а

1. ICP Vegetation. – URL: <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/> (дата обращения: 29.06.2023).
2. Экологические проблемы Якутска. – URL: <http://mirznanii.com/a/329319-1/ekologicheskie-problemy-yakutsk> (дата обращения: 29.06.2023).
3. Пахомов, А. А. Экологические нагрузки на г. Якутск и меры противодействия / А. А. Пахомов, Е. Я. Федорова // Устойчивый Север: общество, экономика, экология, политика. – 2021. – С. 211–215.
4. Чemezov, Е. Н. Состояние атмосферы республики Саха (Якутия) / Е. Н. Чemezov, С. А. Сосина // Символ науки. – 2017. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-atmosfery-respubliki-saha-yakutiya> (дата обращения: 03.11.2023).
5. Жители Якутска смогут сдавать мусор на городской полигон отходов // SakhaNews. – URL: <https://1sn.ru/ziteli-yakutsk-smogut-sdavay-musor-na-gorodskoi-poligon-otkhodov> (дата обращения: 03.11.2023).
6. Научно-технический отчет «Происхождение и состав пыли на территории МО г. Якутск». – URL: https://sinetspark.org/dust_in_yakutsk/tpost/itp1oh7n91-zavershen-nauchnoe-issledovanie-prichin (дата обращения: 04.07.2023).
7. Moss Manual-2020 // ICP Vegetation. – URL: <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/moss-survey> (дата обращения: 05.07.2023).
8. Labmix24 Polish Virginia Tobacco Leaves. – URL: <https://labmix24.com/en/products/IC-INCT-PVTL-6> (дата обращения: 20.01.2024).
9. Steinnes E, Uggerud HT, Pfaffhuber KA, Berg T. Atmospheric deposition of heavy metals in Norway. In: National moss survey 2015. Kjeller: NILU, 2016:53.
10. Яковлева, В. Д. Радиоэкологические проблемы мирных подземных ядерных взрывов в Якутии / В. Д. Яковлева, В. Е. Степанов. – Москва : Спутник+, 2013. – 128 с.
11. Патология человека на Севере / А. П. Авцын, А. А. Жаворонков, А. Г. Марачев, А. П. Милованов. – Москва : Медицина, 1985. – 415 с.
12. Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения (обзор литературы) / Р. А. Голиков, Д. В. Суржиков, В. В. Кислицына, В. А. Штайгер // Научное обозрение. Медицинские науки. – 2017. – № 5. – С. 20–31.
13. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве : Гигиенические нормативы. – Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. – 15 с.

14. Gololobova A, Legostaeva Ya. Potentially toxic elements uptake and distribution in *Betula middendorffii* T. and *Duschekia fruticosa* R. Growing on diamond mining area (Yakutia, Russia). *Plants*, 2024;13(17):2440.
15. Новый мусорный полигон Якутска начнет принимать отходы в 2024 году. – URL: <https://yakutia-daily.ru/novyj-musornyj-poligon-yakutska-nachnet-prinimat-othody-v-2024-godu/> (дата обращения: 24.04.2024).

References

1. ICP Vegetation. Available at: <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/> [Accessed 29 June 2023] (in English).
2. Environmental problems of Yakutsk. Available at: <http://mirznanii.com/a/329319-1/ekologicheskie-problemy-yakutska> [Accessed 29 June 2023] (in Russian).
3. Pakhomov AA, Fedorova EYa. Environmental pressures on the Yakutsk and countermeasures. In: Sustainable North: society, economy, ecology, politics. 2021:211-215 (in Russian).
4. Chemezov EN, Sosina SA. State of the atmosphere of the Republic of Sakha (Yakutia). *Symbol of science*, 2017;1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-atmosfery-respubliki-saha-yakutiya> [Accessed 3 November 2023] (in Russian).
5. SakhaNews. The residents of Yakutsk will be permitted to dispose of their waste at the municipal landfill. Available at: <https://1sn.ru/ziteli-yakutska-smogut-sdavay-musor-na-gorodskoi-poligon-otxodov> [Accessed 03 November 2023] (in Russian).
6. Scientific and technical report “Origin and composition of dust on the territory of the MD Yakutsk”. Available at: https://sinetspark.org/dust_in_yakutsk/tpost/itp1oh7n91-zavershen-nauchnoe-issledovanie-prichin [Accessed 4 July 2023] (in Russian).
7. Moss Manual-2020. ICP Vegetation. Available at: <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/moss-survey> [Accessed 5 July 2023] (in English).
8. Labmix24 Polish Virginia Tobacco Leaves. Available at: <https://labmix24.com/en/products/IC-INCT-PVTL-6> [Accessed 20 January 2024] (in English).
9. Steinnes E, Uggerud HT, Pfaffhuber KA, Berg T. Atmospheric deposition of heavy metals in Norway. In: National moss survey 2015. Kjeller: NILU, 2016:53 (in English).
10. Yakovleva VD, Stepanov VE. The radioecological problems of peaceful underground nuclear explosions in Yakutia. Moscow: Sputnik+, 2013:128 (in Russian).
11. Avtsyn AP, Zhavoronkov AA, Marachev AG, Milovanov AP. Human Pathology in the North. Moscow: Medicine, 1985:415 (in Russian).
12. Golikov RA, Surzhikov DV, Kislitsyna VV, et al. The impact of environmental pollution on public health (literature review). *Scientific Review. Medical Sciences*, 2017;5:20-1 (in Russian).
13. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in soil: Hygienic standards. Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology, 2006:15 (in Russian).
14. Gololobova A, Legostaeva Ya. Potentially toxic elements uptake and distribution in *Betula middendorffii* T. and *Duschekia fruticosa* R. Growing on diamond mining area (Yakutia, Russia). *Plants*, 2024;13(17):2440 (in English).
15. The new landfill in Yakutsk will start taking waste in 2024. Available at: <https://yakutia-daily.ru/novyj-musornyj-poligon-yakutska-nachnet-prinimat-othody-v-2024-godu/> [Accessed 24 April 2024] (in Russian).

МАМАЕВА Саргылана Николаевна – к. ф.-м. н, доцент, зав. каф. общей и экспериментальной физики ФТИ, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова».

E-mail: sargylana_mamaeva@mail.ru

Sargylana N. МАМАЕВА – Cand. Sci (Phys. and Math.), Assoc. Prof., Head of the Department of General and Experimental Physics, Institute of Physics and Technology, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ФРОНТАСЬЕВА Марина Владимировна – к. ф.-м. н., доцент, советник при Дирекции Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, ММНИО «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна.

E-mail: marina@nf.jinr.ru

Marina V. FRONTASYEVA – Cand. Sci (Phys. and Math.), Assoc. Prof., Advisor to the Directorate of the Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna.

КОЛОДЕЗНИКОВ Василий Егорович – к. б. н., директор ИЕН, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова».

E-mail: ve.kolodeznikov@s-vfu.ru

Vasily E. KOLODEZNIKOV – Cand. Sci. (Biology), Director of the Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ЗАХАРОВ Евгений Сергеевич – к. б. н., доцент эколого-географического отделения ИЕН, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова».

E-mail: es.zakharov@s-vfu.ru

Evgeny S. ZAKHAROV – Cand. Sci. (Biology), Assoc. Prof., Ecological and Geographical Department of the Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ИГНАТЬЕВА Галина Андреевна – зав. лаб. радиоэкологии общей и экспериментальной физики ФТИ, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова».

E-mail: galich_88@mail.ru

Galina A. IGNATYEVA – Head of the Radioecology Laboratory of the General and Experimental Physics, Institute of Physics and Technology, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ПЕТРОВА Кристина Алексеевна – зав. лаб. хроматографических методов испытаний общей и экспериментальной физики ФТИ, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова».

E-mail: kristinan_1604@rambler.ru

Kristina A. PETROVA – Head of the Laboratory of Chromatographic Test Methods of the General and Experimental Physics, Institute of Physics and Technology, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

КОНОНОВ Владлен Николаевич – м. н. с. лаб. радиационных технологий ФТИ, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова».

E-mail: vladlenkononov@mail.ru

Vladlen N. KONONOV – Junior Researcher, Laboratory of Radiation Technologies, Institute of Physics and Technology, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.