

УДК 614.77:631.416.8:632.122.1

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МЫШЬЯК В ПОЧВАХ РАЙОНА РАЗМЕЩЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (НА ПРИМЕРЕ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС)

Панов Алексей Валерьевич¹,
riar@mail.ru

Сидорова Елена Валентиновна¹,
sidelena@yandex.ru

Трапезников Александр Викторович²,
vera_zar@mail.ru

Корнеев Юрий Николаевич¹,
riar@mail.ru

Коржавин Александр Васильевич²,
BFS_zar@mail.ru

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
Россия, 249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км.

² Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН,
Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202.

Актуальность. Загрязнение экосистем тяжелыми металлами и мышьяком является значимым антропогенным фактором, негативно влияющим на человека и биоту. В Свердловской области, где ведется добыча и переработка минерального сырья, отмечены высокие уровни выбросов в атмосферу поллютантов от стационарных источников, включая тяжелые металлы. Регион также характеризуется многокомпонентным загрязнением территорий техногенными радионуклидами. С 1964 г. в Свердловской области эксплуатируется Белоярская АЭС. Длительная работа промышленных предприятий и радиационно-опасных объектов увеличивает техногенную нагрузку на экосистемы Урала.

Цель: оценка содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвах наземных экосистем района размещения промышленных предприятий и Белоярской АЭС на основе экологического мониторинга.

Объекты. В 2013 и 2019 гг. исследованы почвы природных (луговых) и аграрных (пашня, лугопастбищные угодья) экосистем 30-км зоны влияния Белоярской АЭС. В почвенном покрове изучено содержание 17 элементов, относящихся к I (Pb, Zn, Cd, As, Hg), II (Mo, Cu, Ni, Co, Cr, Sb), III (Sr, Mn, V, W, Ba) классам опасности, а также железо.

Методы. Оценку валового содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве проводили в испытательной лаборатории агроэкологии ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат аккредитации RA.RU.513078). Для подготовки почвенных проб к измерениям использовали методы «холодного пара» и «мокрого» озоления с помощью микроволновой системы MARS-5 (CEM, США). Элементы в образцах определяли атомно-абсорбционным и плазменно-эмиссионным методами анализа. Для измерений использовали аксиальный атомно-эмиссионный (оптический) спектрометр с атомизацией проб в индуктивно-связанной плазме (ИСП-ОЭС) Liberty II (Varian, Австралия-США) и спектрометр КВАНТ. Зета-1 с приставкой ГРГ-3.

Результаты. Показано, что за 2013–2019 гг. соотношение элементов в почвенном покрове наземных экосистем района расположения Белоярской АЭС было достаточно стабильным. По снижению валового содержания в почве тяжелые металлы и мышьяк в 2019 г. располагались в ряд: Fe (среднее – 16700 мг/кг) > Mn (879) > Ba (134) > Zn (51) > Ni (35) > Cr (32) > V (30) > Sr (28) > Cu (21) > Pb (12,4) > Co (11,9) > W (6,7) > Sb (2,4) > As (1,7) > Mo (1,5) > Cd (0,2) > Hg (0,01 мг/кг). По общему накоплению элементов в почве наземные экосистемы находятся в соотношении: пашня (18,7 г/кг почвы) > луга (14,9 г/кг) > целина (12,6 г/кг). В основном такая разница обусловлена отличиями по содержанию в почве железа, вклад которого в региональный фон составляет 90...95 %. Слабая корреляция между содержанием в почве элементов и расстоянием от Белоярской АЭС (–0,44...0,29 в 2013 г. и –0,29...0,38 в 2019 г.) показала отсутствие значимых выбросов токсикантов в окружающую среду от атомной станции как вследствие ее многолетней работы, так и после начала эксплуатации реактора БН-800. Среди поллютантов I класса опасности, накопленных в почве, доминирует цинк (вклад 76...78 %), на втором месте идет свинец (18...21 %). Во II классе опасности основными почвенными загрязнителями являются никель (45...34 %) и хром (28...30 %). В III классе опасности преобладают марганец (68...81 %) и барий (14...27 %). Показано, что в 25...63 % почвенных проб в районе Белоярской АЭС валовое содержание никеля не отвечает ориентировочно допустимым концентрациям, установленным в СанПиН 1.2.3685–21. Также на всех контрольных участках луговых экосистем превышена предельно-допустимая концентрация по содержанию сурьмы. В 2019 г. в 4...25 % проб почв пашни и лугов отмечено несоответствие предельно-допустимой концентрации по марганцу и в 4...11 % проб почв пашни превышены ориентировочно допустимые концентрации по мышьяку. Уровни накопления в почве ряда тяжелых металлов превышают также региональный фон Свердловской области: по никелю в 25...63 % почвенных образцов природных и аграрных экосистем, по марганцу в 10...50 % проб почв пашни и лугов. Наибольшее количество элементов (в среднем 42 %) аккумуляровано в 0–5 см слое почвы. Максимальное накопление в верхнем почвенном горизонте отмечено у кадмия (62 %), мышьяка (49 %) и свинца (48 %), а минимальное у сурьмы (29 %) и марганца (28 %). По общему запасу токсикантов в 0–5 см слое почвы они располагаются в ряд: Cd > As > Pb > Zn > Cu > Mo > Hg > Sr > Ni > Cr > V > W > Co > Ba > Sb > Mn. В более глубоких горизонтах (5–10, 10–15 и 15–20 см) элементы распределены достаточно равномерно. По сравнению с другими техногенно загрязненными регионами России, результаты мониторинга содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве района Белоярской АЭС показывают стабильную экологическую обстановку. При планировании дальнейших мониторинговых исследований необходимо обратить внимание на поведение в почве мышьяка, никеля, сурьмы, марганца, кадмия и свинца. Повышенное содержание данных токсикантов в почве может привести к их накоплению в сельскохозяйственной и природной пищевой продукции.

Ключевые слова:

Наземные экосистемы, почвенный покров, антропогенное воздействие, поллютанты, техногенное загрязнение, мониторинг, гигиеническая оценка, экологическая безопасность.

Введение

Загрязнение тяжелыми металлами и мышьяком экосистем является значимым антропогенным фактором, негативно влияющим на человека и биоту [1–3]. Особенно велик вклад поллютантов в осложнение экологической обстановки на урбанизированных и промышленно развитых территориях, где ведется добыча руд [4–8]. В России большое количество месторождений железа, меди, никеля и других металлов находится в Уральском федеральном округе. Урал с его мощным горно-металлургическим комплексом является крупнейшим в стране регионом по переработке минерального сырья. Здесь добывают колчеданные руды, содержащие до 30 элементов, включая тяжелые металлы, отнесенные к I, II и III классам опасности. При этом ряд наиболее токсичных поллютантов (ртуть, цинк, мышьяк и др.) обладают высокой летучестью, легко распространяясь с пылью в приземной атмосфере [9]. Поэтому промышленная разработка рудных месторождений приводит к рассеиванию и миграции тяжелых металлов и мышьяка в природных и аграрных экосистемах, накоплению их в живых организмах и пищевой продукции, вызывая в высоких концентрациях токсические эффекты у растений, животных и человека [10–12].

Свердловская область Уральского федерального округа входит в пять наиболее неблагоприятных по экологической ситуации регионов России. Так, в 2020 г. максимальные выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников зафиксированы в населенных пунктах: Рефтинский (229,7 тыс. т), Нижний Тагил (122,0 тыс. т), Качканарский (82,3 тыс. т), Серовский (39,1 тыс. т), Пелым (29,3 тыс. т), Екатеринбург (22,1 тыс. т). Сложная экологическая обстановка отмечена и в расположенной рядом Челябинской области, в городах Магнитогорск (годовой выброс 185,6 тыс. т) и Челябинск (121,4 тыс. т). За последние десять лет в выделенных областях зафиксировано увеличение поступления в окружающую среду, в составе выбросов, марганца, кадмия и свинца [13].

На экологию Уральского региона оказывает определенное влияние и радиационный фактор. Он включает в себя многокомпонентное загрязнение территорий техногенными радионуклидами вследствие испытаний ядерного оружия на полигоне «Новая земля»; многолетних сбросов и выбросов, а также ряда аварий на ПО «Маяк» при производстве и переработке ядерных материалов; проведения ядерных взрывов в мирных целях; добычи урановой руды; работы Белоярской АЭС [9].

Белоярская атомная станция расположена в 42 км от г. Екатеринбург и является старейшей АЭС с разными типами энергоблоков. Первые два реактора на тепловых нейтронах (АМБ-100 и АМБ-200) остановлены более 30 лет назад и сейчас находятся на стадии вывода из эксплуатации. Реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем БН-600 и БН-800 эксплуатируются в настоящее время [9, 14, 15]. Кроме Екатеринбурга, ближайшими круп-

ными источниками загрязнения окружающей среды в районе размещения Белоярской АЭС являются промышленные предприятия поселка Рефтинский, который расположен в северо-восточном направлении от атомной станции на расстоянии 35 км. Остальные критичные по объемам выбросов населенные пункты удалены от АЭС более чем на 100 км. Учитывая, что в Рефтинском фиксируются максимальные уровни выбросов, предприятия данного населенного пункта можно рассматривать как приоритетный источник загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком района атомной станции. Выбросы промышленных предприятий Уральского региона и Белоярской АЭС через воздушный бассейн поступают на почвенный покров наземных экосистем. Таким образом, природные экосистемы и агроценозы, с их большой открытой площадью, являются естественными планшетами, аккумулирующими в почве поллютанты выбросов.

Для оценки экологической обстановки в зоне влияния Белоярской АЭС, как наиболее крупного радиационно-опасного и значимого промышленного объекта в Свердловской области, в 2013 г. была создана сеть экологического мониторинга природных наземных [14] и аграрных [15] экосистем. Проанализировано многолетнее влияние атомной станции на радиационную обстановку в 30-км зоне вокруг нее. Однако, учитывая важность поступления в организм человека с местными сельскохозяйственными и природными пищевыми продуктами не только радионуклидов, но и других токсикантов, целью данной работы являлась оценка содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве наземных экосистем района размещения Белоярской АЭС, а также анализ влияния радиационно-опасного объекта на экологическую обстановку региона. В число основных задач исследования входило:

- определение уровней загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком почвенного покрова природных (луговых) и аграрных (пашня, целина) экосистем в 30-км зоне вокруг Белоярской АЭС;
- выявление закономерностей накопления поллютантов в почвах наземных экосистем района размещения Белоярской атомной станции;
- установление приоритетных загрязнителей, а также риска (вероятности) превышения содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве района Белоярской АЭС по отношению к требованиям санитарно-гигиенических нормативов (СанПиН 1.2.3685–21) и региональному техногенному фону Свердловской области;
- анализ влияния выбросов Белоярской АЭС на поступление токсикантов в почву наземных экосистем в районе размещения радиационно-опасного объекта.

Материалы и методика исследования

Вся территория 30-км зоны влияния Белоярской АЭС (исключая водоем-охладитель) представляет собой слабохолмистую равнину и характеризуется разнообразием наземных экосистем. Природные экосистемы расположены в большей степени в западном,

северном и восточном направлениях от атомной станции. Они представлены преимущественно смешанными березово-сосновыми лесами, занимающими около 85 % территории, а также злаково-разнотравными лугами [14]. Площадь агроэкосистем в 13-км зоне наблюдения Белоярской АЭС составляет лишь 5,3 %. В 15–30-км зоне влияния атомной станции площадь агроценозов существенно увеличивается. В структуре сельскохозяйственных угодий пашня занимает 88 % от общей площади, целинные участки (сенокосы и пастбища) составляют 12 %. Пашня расположена преимущественно в южном и юго-восточном направлениях от АЭС. Целинные участки распределены равномерно по всем направлениям, кроме северного, на расстоянии 10–30 км от атомной станции [15].

На основе созданной сети экологического мониторинга наземных экосистем в районе расположения Белоярской АЭС в почвенном покрове изучали содержание 17 элементов, относящихся к I (Pb, Zn, Cd, As, Hg), II (Mo, Cu, Ni, Co, Cr, Sb), III (Sr, Mn, V, W, Ba) классам опасности и железо. На различном расстоянии и направлениях от атомной станции исследованы 4 контрольных участка природных (луговых) и 31 участок аграрных (пашня, целина) экосистем. При мониторинге особое внимание уделялось агроценозам как наиболее критичному пути поступления поллютантов в организм человека по пищевым цепям. Подробная карта-схема точек пробоотбора представлена в [15]. Образцы почвы отбирали в 2013 г. на этапе завершения строительства реактора БН-800 и в 2019 г. через три года после начала промышленной эксплуатации нового энергоблока. Это дало возможность оценить сформировавшийся техногенный фон в районе Белоярской АЭС за период ее многолетней работы (эксплуатация реакторов АМБ-100, АМБ-200 и БН-600), а также изменение экологической ситуации в регионе атомной станции после запуска БН-800.

Отбор почвенных проб, их подготовку к анализу на содержание тяжелых металлов и мышьяка и измерения проводили в испытательной лаборатории агроэкологии ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат аккредитации RA.RU.513078) по аттестованным методикам в соответствии с [16–19]. В природных экосистемах и на целинных участках агроэкосистем отбирали верхний слой почвы глубиной 0–5 см, на пашне – пахотный горизонт глубиной 0–20 см. На двух целинных участках пробы почвы дополнительно отбирали послойно (на глубину 0–2, 2–5, 5–10, 10–15 и 15–20 см) для оценки вертикального распределения элементов в почвенном профиле. На каждом контрольном участке брали смешанную пробу почвы массой не менее 1,0 кг, состоящую из 10–15 индивидуальных почвенных образцов после их тщательного перемешивания. Пробы почв высушивали в течение 3–5 часов, удаляли камни и органические остатки. Далее почву просеивали через сито 2 мм. Для подготовки почвенных проб к измерениям использовали методы «холодного пара», а также «мокрого» озоления с помощью микроволновой системы MARS-5 (СЕМ, США). Валовое

содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвенных образцах определяли атомно-абсорбционным и плазменно-эмиссионным методами анализа. Измерения проводили на аксиальном атомно-эмиссионном (оптическом) спектрометре с атомизацией проб в индуктивно-связанной плазме (ИСП–ОЭС) Liberty II (Varian, Австралия–США) и спектрометре КВАНТ. Зета-1 с приставкой ГРГ-3. Используемые средства измерений и методическое обеспечение позволяли достоверно определять содержание тяжелых металлов и мышьяка в почве на уровне регионального фона. Оценку экологической безопасности почв проводили сопоставляя результаты измерений валового содержания в них поллютантов с нормативами СанПиН 1.2.3685–21 [20] и с региональным фоном по данным мониторинга Росгидромета в Свердловской области [21].

Результаты исследования и обсуждение

Почвенный покров наземных экосистем в районе размещения Белоярской АЭС формируют преимущественно дерново-подзолистые почвы с локальными включениями темно-серых лесных. В западном и южном направлениях от атомной станции отмечены выщелоченные черноземы. Гранулометрический состав почв варьирует от легкого до среднего и определяется как супесями, так и суглинками. Кислотность пахотных почв характеризуется слабокислой реакцией или близкой к нейтральной [15].

Валовое содержание 17 анализируемых элементов в почвенных образцах района размещения Белоярской АЭС варьирует в диапазоне шести порядков величин, в среднем от 16,5 тыс. мг/кг (Fe) до 0,015 мг/кг (Hg) почвы (табл. 1). Максимальное накопление тяжелых металлов в почве характерно для железа, марганца и бария, а минимальное – для ртути и кадмия. Последние два тяжелых металла являются наиболее токсичными и относятся к I классу опасности. За исследуемый период (2013–2019 гг.) соотношение большинства элементов в почвенном покрове наземных экосистем было достаточно стабильным. Так, в 2013 г. по снижению среднего содержания в почве тяжелые металлы и мышьяк располагались в следующий ряд: Fe (среднее – 16286 мг/кг) > Mn(663) > Ba(327) > Zn(43) > Ni(42) > V(28) > Cr(26) > Sr(24) > Cu(11) > Pb(9,1) > Co(7,4) > As(2,1) > W(1,64) > Sb(1,55) > Mo(1,2) > Cd(0,3) > Hg(0,02 мг/кг).

В 2019 г. соотношение элементов изменилось только для пары ванадия и хрома, а также вольфрама, сурьмы и мышьяка, приняв вид: Fe (среднее – 16700 мг/кг) > Mn(879) > Ba(134) > Zn(51) > Ni(35) > Cr(32) > V(30) > Sr(28) > Cu(21) > Pb(12,4) > Co(11,9) > W(6,7) > Sb(2,4) > As(1,7) > Mo(1,5) > Cd(0,2) > Hg(0,01 мг/кг).

Из представленных данных видно, что за шесть лет произошло незначительное увеличение содержания в почвенном покрове исследуемой территории большинства элементов (марганца, цинка, хрома, стронция, меди, свинца, кобальта сурьмы, молибдена), которое составило 1,2...1,9 раз. Максимальное повышение отмечено у вольфрама – до 4-х раз. При этом

валовое содержание в почве данного элемента не велико. За аналогичный период несколько снизилось накопление в почвенном покрове бария, никеля, мышьяка и ртути (до 1,2...2,4 раза). Выделенные зако-

номерности коррелируют с данными по увеличению за последние 10 лет объемов выбросов в атмосферу марганца и свинца и по снижению выбросов никеля и мышьяка, согласно [13].

Таблица 1. Среднее валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка в почве наземных экосистем в районе размещения Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., мг/кг

Table 1. Average gross content of heavy metals and arsenic in the soil of terrestrial ecosystems in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, mg/kg

Элемент Element	Пашня/Arable land		Целина/Virgin land		Луг/Meadow	
	2013	2019	2013	2019	2013	2019
	n=27	n=25	n=4	n=3	n=4	n=4
I класс опасности/I hazard class						
Pb	7,62±1,66	11,8±3,11	8,26±2,49	12,9±4,27	20,1±8,4	15,8±5,3
Zn	37,6±12,1	49,2±12,6	35,1±3,42	26,8±0,64	86,5±12,7	73,9±35,3
Cd	0,23±0,06	0,21±0,12	0,093±0,075	0,138±0,004	0,71±0,29	0,61±0,28
As	2,11±1,11	1,72±0,57	2,04±0,78	1,96±0,54	2,37±0,11	1,78±0,36
Hg	0,017±0,006	0,013±0,005	0,016±0,002	0,008±0,004	0,053±0,028	0,011±0,003
II класс опасности/II hazard class						
Mo	1,31±0,38	1,28±0,56	0,88±0,24	2,36±1,17	0,94±0,26	2,21±1,61
Cu	9,71±2,66	21,8±5,14	11,02±2,45	13,2±3,36	16,7±10,6	17,6±4,4
Ni	43,8±11,8	36,9±9,48	35,4±7,48	27,4±1,82	34,8±13,7	25,6±17,1
Co	7,58±1,36	12,9±3,65	6,91±0,82	7,92±3,46	7,11±1,64	5,96±0,98
Cr	27,6±7,69	35,1±10,8	23,8±5,67	24,0±2,26	19,6±6,1	19,7±6,5
Sb	0,86±0,42	2,04±1,02	0,69±0,07	0,76±0,08	6,77±1,19	6,51±2,96
III класс опасности/III hazard class						
Sr	25,1±7,19	29,3±8,91	17,2±3,31	16,1±2,41	22,8±11,7	24,5±14,2
Mn	638±205	857±262	499±217	628±142	998±367	1137±422
V	29,3±5,87	32,3±7,96	27,3±5,39	24,2±3,29	17,9±1,9	15,5±3,9
W	1,59±0,71	7,21±1,52	1,37±0,46	4,31±0,22	2,21±0,38	3,88±1,62
Ba	351±181	128±71	247±104	159±13,5	244±55	169±119
Вне классов опасности/Out of hazard classes						
Fe	17176±4114	17742±3968	14340±2488	8974±1635	12448±4036	14315±10242

По общему накоплению тяжелых металлов и мышьяка в почве района размещения Белоярской АЭС исследуемые наземные экосистемы можно расположить в ряд: пашня (18,7 г/кг почвы) > луга (14,9 г/кг) > целина (12,6 г/кг). В основном разница по суммарному содержанию элементов в наземных экосистемах обусловлена различиями по накоплению в почве железа, вклад которого в техногенный фон составляет 90...95 %. В почвенном покрове пашни отмечается также повышенное содержание ряда других металлов: Ni, Co, Cr, Sr, V, W и Ba. С одной стороны, это можно объяснить большим количеством точек пробоотбора на пашне и, соответственно, более представительными данными, характеризующими регион исследования. Другой возможной причиной таких различий может являться ежегодное применение на пашне минеральных удобрений и дополнительное поступление в почву ряда тяжелых металлов, содержащихся в составе агроメリорантов [22–24]. Также за весь период наблюдений на участках природных экосистем отмечено преобладающее (до 4,6...9,2 раз), по сравнению с агроценозами, содержание в почве сурьмы. Помимо техногенного воздействия, более высокое накопление в почве данного элемента, как и других, может быть обусловлено их природным происхождением в материнских породах.

Поскольку контрольные участки на лугах и целине расположены ближе к Белоярской АЭС, чем точки пробоотбора на пашне, где отмечены более высокие концентрации ряда поллютантов, можно предположить, что выбросы тяжелых металлов в окружающую среду от атомной станции незначительны. Для более точной

оценки возможного влияния работы Белоярской АЭС на поступление токсикантов в наземные экосистемы была проанализирована корреляция между содержанием тяжелых металлов и мышьяка в почве контрольных участков и расстоянием точек пробоотбора от радиационно-опасных объектов. Среди всех изученных элементов коэффициенты корреляции варьировали в диапазоне – 0,44...0,29 в 2013 г. и в пределах –0,29...0,38 в 2019 г. Учитывая низкие значения коэффициентов прямой и обратной корреляции, нельзя говорить о достоверном влиянии Белоярской АЭС на ухудшение экологической обстановки за счет выбросов тяжелых металлов как вследствие многолетней работы атомной станции, так и после начала эксплуатации нового реактора БН-800.

Рассматривая вклад токсичных элементов, относенных к трем классам опасности, в загрязнение почвенного покрова района размещения Белоярской АЭС, отметим, что среди поллютантов I класса доминирующая роль принадлежит цинку. Его доля среди наиболее опасных токсикантов стабильно составляет 76...78 % (рис. 1). На втором месте идет свинец (18...21 %). Вклад мышьяка в группе токсикантов I класса опасности не превышает 2...3 %, а кадмия и ртути составляет менее 1 %.

Среди металлов II класса опасности доминирует никель, хотя за шесть лет его вклад в состав элементов данной группы снизился с 45 до 34 %, в основном за счет увеличения роли меди на 5 %. Вклад хрома (28...30 %) и кобальта (8...10 %) в загрязнение достаточно стабильны, а роль молибдена и сурьмы минимальны (1...4 %).

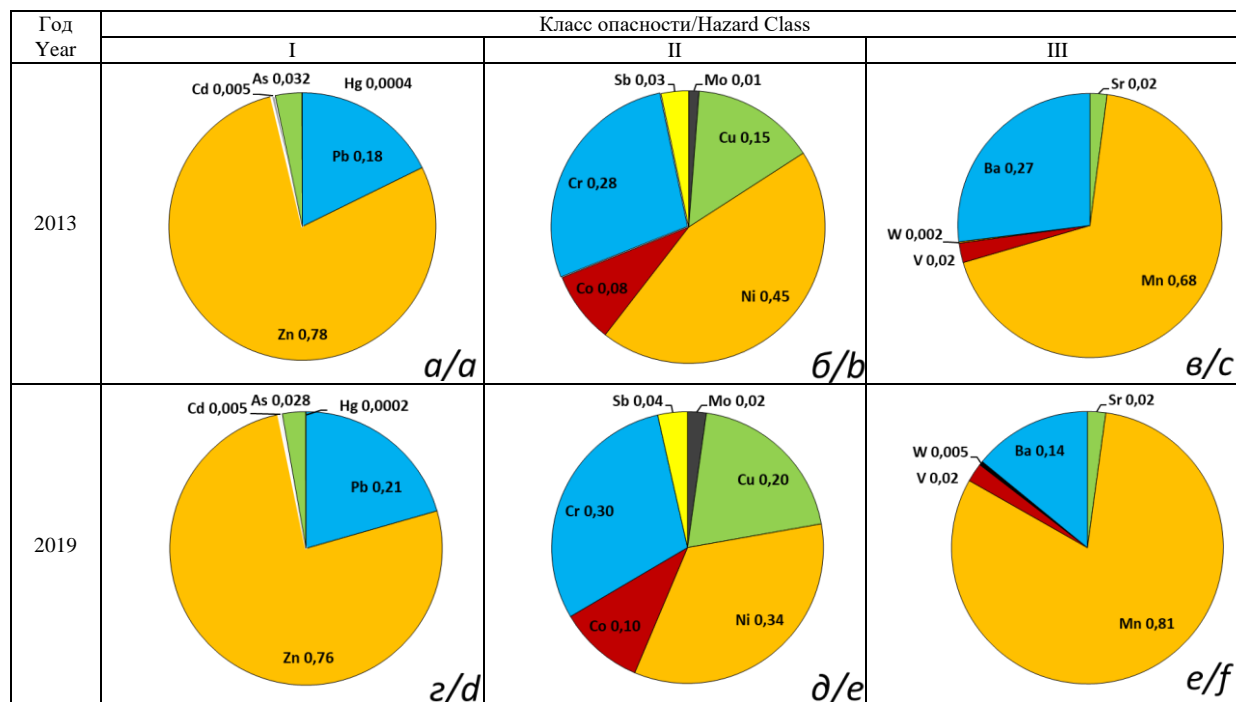


Рис. 1. Соотношение элементов I (а, з), II (б, д) и III (в, е) классов опасности в почве наземных экосистем района расположения Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг.

Fig. 1. Ratio of the elements of I (a, d), II (b, e) and III (c, f) hazard classes in the soil of terrestrial ecosystems in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019

В III классе опасности основным токсикантом является марганец, причем его вклад в компонентный состав загрязнения тяжелыми металлами данной группы за последние годы вырос на 13 %. При этом роль бария, который расположен на втором месте в данном классе, на столько же снизилась. Вклад остальных элементов III класса опасности (ванадия, стронция и вольфрама) минимален и не превышает в сумме 5 %.

Для оценки экологической безопасности почв наземных экосистем в районе расположения Белоярской АЭС были определены риски (вероятности) превышения действующих санитарно-гигиенических нормативов (СанПиН 1.2.3685–21) по содержанию поллютантов в почвенном покрове и показателей регионального фона [20, 21]. При достаточно высоком уровне выбросов загрязняющих веществ в ряде промышленных центров Свердловской области в районе расположения Белоярской АЭС валовое содержание большей части тяжелых металлов в почве наземных экосистем отвечает установленным требованиям СанПиН 1.2.3685–21. Из десяти нормируемых в почве токсикантов наиболее сложная ситуация складывается с содержанием в почве никеля. Несмотря на снижение в последние годы выбросов в атмосферу данного элемента, от 25 до 63 % проб почвы в районе Белоярской АЭС все еще содержат никель, превышающий ориентировочно допустимую концентрацию (ОДК) элемента для наземных экосистем региона с учетом их почвенных характеристик (табл. 2). В то же время стоит отметить, что это превышение составляет максимум 1,5 раза от уровня ОДК.

На контрольных участках луговых экосистем за весь период наблюдений была превышена до 2-х раз предельно-допустимая концентрация (ПДК) по содержанию сурьмы во всех почвенных образцах. В 2019 г. в 4...25 % проб почв пашни и лугов отмечено незначительное (до 30 %) превышение ПДК по содержанию в почве марганца, что объясняется увеличением выбросов в атмосферу этого элемента за последние 10 лет. В 4...11 % проб почв пашни превышены ОДК по мышьяку (до 1,3 раза), что, по всей видимости, обусловлено применением на сельскохозяйственных угодьях минеральных удобрений. В целом представленные результаты показывают достаточно стабильную экологическую обстановку по содержанию поллютантов в почве района расположения Белоярской АЭС. Однако при планировании дальнейших мониторинговых исследований в регионе необходимо обратить внимание на поведение в почве мышьяка, никеля, сурьмы, марганца, кадмия и свинца. Повышенное содержание данных токсикантов в почвенном покрове может привести к их накоплению в сельскохозяйственной и природной пищевой продукции и, соответственно, в рационе питания населения.

Уровни накопления в почве наземных экосистем района расположения Белоярской АЭС никеля и марганца превышают в ряде случаев не только нормативы СанПиН 1.2.3685–21, но региональный техногенный фон, характерный для Свердловской области [21]. По никелю такое несоответствие отмечено в 25...63 % почвенных образцов всех типов наземных экосистем (табл. 3). По марганцу превышение регионального фона зафиксировано в 10...50 % проб почв пашни и лугов. Стоит отметить, что отличия от регионального

фона отмечаются в некоторых почвенных пробах и по другим тяжелым металлам. Это подтверждает определенное влияние выбросов токсикантов от промыш-

ленных предприятий района размещения Белоярской АЭС на формирование экологической обстановки региона исследования.

Таблица 2. Доля проб почв в районе размещения Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг. с превышением нормативов СанПиН 1.2.3685–21 по содержанию токсикантов, отн. ед.

Table 2. Share of soil samples in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019 in excess of SanPiN 1.2.3685–21 standards for the content of toxicants

Элемент Element	ПДК(ОДК), мг/кг Permissible level, mg/kg [20]			Пашня/Arable land		Целина/Virgin land		Луг/Meadow	
	I*	II**	III***	2013	2019	2013	2019	2013	2019
I класс опасности/I hazard class									
Pb	(32,0)	(65,0)	(130,0)	0	0	0	0	0	0
Zn	(55,0)	(110,0)	(220,0)	0	0	0	0	0	0
Cd	(0,5)	(1,0)	(2,0)	0	0	0	0	0	0
As	(2,0)	(5,0)	(10,0)	0,11	0,04	0	0	0	0
Hg		2,1		0	0	0	0	0	0
II класс опасности/II hazard class									
Cu	(33,0)	(66,0)	(132,0)	0	0	0	0	0	0
Ni	(20,0)	(40,0)	(80,0)	0,63	0,33	0,25	0,25	0,5	0,25
Sb		4,5		0	0	0	0	1	1
III класс опасности/III hazard class									
Mn		1500,0		0	0,04	0	0	0	0,25
V		150,0		0	0	0	0	0	0

I* – песчаные и супесчаные/sandy and sandy loam; II** – кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl < 5,5/acidic (loam and clay), pH KCl < 5,5; III*** – близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl > 5,5/close to neutral, neutral (loam and clay), pH KCl > 5,5.

Таблица 3. Доля проб почв в районе размещения Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг. с превышением содержания тяжелых металлов по отношению к региональному фону

Table 3. Share of soil samples in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019 with excess content of heavy metals in relation to the regional background

Элемент Element	Фон, мг/кг Background, mg/kg [21]	Пашня/Arable land		Целина/Virgin land		Луг/Meadow	
		2013	2019	2013	2019	2013	2019
Pb	27	0	0	0	0	0,25	0
Zn	94	0	0	0	0	0,25	0,5
Cd	1,1	0	0	0	0	0	0
Hg	0,05	0	0	0	0	0,5	0
Cu	71	0	0	0	0	0	0
Ni	41	0,63	0,29	0,25	0	0,5	0,25
Co	20	0	0,08	0	0	0	0
Cr	42	0	0,13	0	0	0	0
Mn	926	0,11	0,21	0	0	0,5	0,5
Fe	23657	0,04	0,04	0	0	0	0,25

На примере двух целинных участков, используемых в качестве пастбищ, дана оценка распределения токсикантов I, II и III классов опасности в почвенном профиле на глубину до 20 см, а также шестилетняя динамика вертикальной миграции элементов (рис. 2). Наибольшее количество тяжелых металлов и мышьяка аккумулировано в 0–5 см слое почвы, которое составляет в среднем 42 % об общего запаса токсикантов на глубине до 20 см. Максимальное накопление в верхнем почвенном горизонте отмечено у кадмия (62 %), мышьяка (49 %) и свинца (48 %), а минимальное – у сурьмы и марганца (29 и 28 %, соответственно). По общему запасу элементов в верхнем (0–5 см) слое почвы их можно расположить в ряд: Cd>As>Pb>Zn>Cu>Mo>Hg>Sr>Ni>Cr>V>W>Co>Ba>Sb>Mn. В трех более глубоких горизонтах тяжелые металлы и мышьяк распределены достаточно равномерно. При этом за шесть лет среднее соотношение элементов в слоях почвы 0–5, 5–10, 10–15 и 15–20 см изменилось с 43, 21, 19, 17 % на 40, 20, 20, 20 %, соответственно. Это говорит о медленной вертикальной

миграции токсикантов из верхнего горизонта в более глубокие слои почвы. Также снижение во времени запаса элементов в 0–5 см слое почвы подтверждает отсутствие в последние годы значимого дополнительного поступления тяжелых металлов и мышьяка от выбросов промышленных предприятий Свердловской области, а существующая техногенная нагрузка на наземные экосистемы сформировалась за длительный (десять лет) период их работы. Исключением из выделенной закономерности являются лишь молибден и вольфрам, у которых произошло увеличение за рассматриваемый период валового содержания в верхнем слое почвы с 36 до 50 % и с 32 до 44 %, соответственно.

Сравнительный анализ содержания тяжелых металлов и мышьяка в почве района расположения Белоярской АЭС с данными, полученными в других регионах России, показывает, что по ряду элементов они близки и являются типичными, по другим существенно различаются. Так, в урбанизированных ландшафтах промышленных и сельскохозяйственных

центров Приморского края (города Владивосток и Уссурийск) отмечено схожее валовое содержание в почве кобальта (15 мг/кг) и никеля (29 мг/кг) [8]. В то же время накопление в почвенном покрове ванадия

(89...94 мг/кг), хрома (92...94 мг/кг), меди (81 мг/кг) и цинка (155...260 мг/кг) в 3–4 раза выше, по сравнению с элементами исследуемого района Свердловской области.

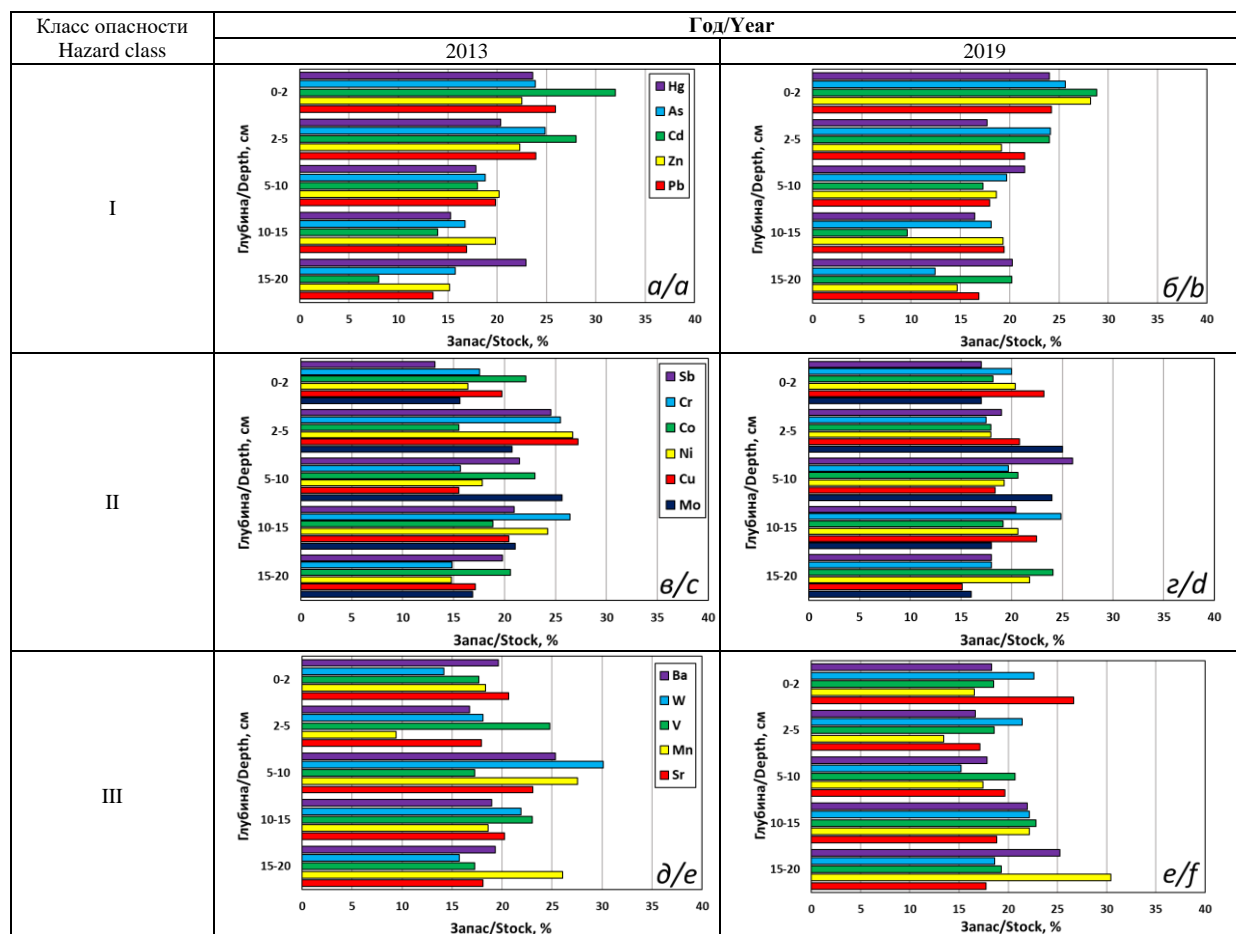


Рис. 2. Запас элементов I (а, б), II (в, г) и III (д, е) классов опасности в 20-см почвенном профиле природных экосистем в районе Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., %

Fig. 2. Stock of elements of I (a, b), II (c, d) and III (e, f) hazard classes in the 20-cm soil profile of the natural ecosystems in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, %

В почвах Республики Коми (Усинский и Печорский районы), расположенной рядом с Уральским федеральным округом, содержание тяжелых металлов характеризуется широкой вариабельностью, которая определяется гранулометрическим составом почв и геохимическими особенностями ландшафтов. По большинству изученных элементов в почвенном покрове Республики Коми их содержание коррелирует с результатами мониторинга района размещения Белоярской АЭС. Такими тяжелыми металлами являются свинец (содержание в почве 2,8...25,2 мг/кг), цинк (9,0...54,0 мг/кг), кадмий (0,08...0,8 мг/кг) и марганец (5,7...1400) [25]. Однако показатели накопления в почве меди (1,7...11,7 мг/кг) и никеля (1,9...19,1 мг/кг) почти в 2 раза ниже, чем в почвах исследуемого района Свердловской области, а ртути (0,07...0,26 мг/кг) более чем в пять раз выше.

Экологический мониторинг почв Восточного Забайкалья [26] показал, что накопление в них основных токсических элементов I и II классов опасности

хорошо согласуется с аналогичными показателями для почв района расположения Белоярской АЭС. Так, валовое содержание свинца в почвах Забайкалья варьирует в пределах 1,1...36,0 мг/кг, кадмия в диапазоне 0,03...0,31 мг/кг, цинка в пределах 12,7...71,5 мг/кг. Только накопление меди (0,13...16,6 мг/кг) несколько выше, чем в регионе исследования Свердловской области.

Все представленные в работе данные демонстрируют схожесть проблем техногенного загрязнения наземных экосистем в промышленно развитых регионах России. Тяжелые металлы и мышьяк являются одними из наиболее значимых поллютантов, которые выбрасывают предприятия горно-металлургического комплекса. При этом элементы I, II и III классов опасности, поступающие в окружающую среду, характеризуются выраженным токсическим и мутагенным действием [3, 7, 11]. Также важно отметить, что вклад выбросов атомных станций в формирование дополнительной техногенной нагрузки, свя-

занной с загрязнением тяжелыми металлами, по сравнению с промышленными предприятиями ничтожно мал.

Заключение

Представленные в работе результаты мониторинга могут служить информационной базой для многофакторной эколого-токсикологической оценки качества почв в районе размещения Белоярской АЭС [27, 28]. В совокупности с полученными ранее данными радиэкологического мониторинга природных и аграр-

ных экосистем [14, 15] они дают возможность провести комплексный анализ радиационно-химического риска для здоровья населения, проживающего в зоне влияния Белоярской атомной станции. Таким образом, мониторинг содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвенном покрове должен являться составной частью оценки экологической обстановки в регионе размещения промышленных предприятий и радиационно-опасных объектов для принятия обоснованных решений по ее оздоровлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Risk assessment of metal contamination in soil and groundwater in asia: a review of recent trends as well as existing environmental laws and regulations / T. Teh, N.A.R. Norulaini, M. Shahadat, Y. Wong, A.K. Mohd Omar // *Pedosphere*. – 2016. – V. 26 (4). – P. 431–450.
2. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area / Y. Qian, F. Gallagher, Y. Deng, M. Wu, H. Feng // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 24. – P. 23549–23558.
3. Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies // *Soil*. – 2015. – V. 1. – P. 35–46.
4. Ettl V. Soil contamination near non-ferrous metal smelters: a review // *Applied Geochemistry*. – 2016. – V. 64. – P. 56–74.
5. Trace metal contamination in urban soils of China / X.S. Luo, S. Yu, Y.G. Zhu, X.D. Li // *Science of the Total Environment*. – 2012. – V. 421–422. – P. 17–30.
6. Donga R., Jiab Z., Lia S. Risk assessment and sources identification of soil heavy metals in a typical county of Chongqing Municipality, Southwest China // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2018. – V. 3. – P. 275–281.
7. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review / S. Tong, H. Li, L. Wang, M. Tudi, L. Yang // *International Journal Environmental Research and Public Health*. – 2020. – V. 17. – P. 3099.
8. Жарикова Е.А. Тяжелые металлы в городских почвах: оценка содержания и экологического риска // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 164–173.
9. Особенности радиационной обстановки на Урале / В.И. Уткин, М.Я. Чеботина, А.В. Евстигнеев, Н.М. Любашевский. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 150 с.
10. Методология экологического мониторинга аграрных предприятий в зоне Урала / И.А. Шкуратова, И.М. Донник, А.В. Трапезников, А.Г. Исаева, Н.А. Верещак, А.С. Кривоногова, А.А. Баранова // *Аграрный вестник Урала*. – 2012. – № 2 (94). – С. 60–62.
11. Панов А.В., Переволоцкая Т.В. Методология оценки рисков для агроэкосистем в условиях техногенного загрязнения // *Сельскохозяйственная биология*. – 2020. – Т. 55. – № 3. – С. 468–480.
12. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation – a critical review / R.Y. Kim, J.K. Yoon, T.S. Kim, J.E. Yang, G. Owens, K.R. Kim // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2015. – V. 37. – P. 1041–1061.
13. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021. – 864 с.
14. Assessment of the influence of BN-800 operation on the radioecological situation in the vicinity of Beloyarsk NPP / A.V. Panov, V.K. Kuznetsov, N.N. Isamov, I.V. Geshel, A.V. Trapeznikov, A.V. Korzhavin // *Atomic Energy*. – 2021. – V. 129 (5). – P. 297–304.
15. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в районе Белоярской АЭС / А.В. Панов, А.В. Трапезников, В.К. Кузнецов, А.В. Коржавин, Н.Н. Исамов, И.В. Гешель // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 146–157.
16. РД 52.18.718–2008. Организация и порядок проведения наблюдений за загрязнением почв токсикантами промышленного происхождения. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2008. – 72 с.
17. ГОСТ 17.4.4.02.2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2018. – 21 с.
18. ПНД Ф 16.1.2.3:3.10–98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания ртути в твердых объектах методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (метод «холодного пара»). – М.: Госкомэкология России, 1998. – 11 с.
19. ПНД Ф 16.1.2.3:3.11–98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. – М.: Госкомэкология России, 2005. – 28 с.
20. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: Роспотребнадзор, 2021. – 987 с.
21. Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2020 году. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2021. – 128 с.
22. Chen M., Graedel T.E. The potential for mining trace elements from phosphate rock // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – V. 91. – P. 337–346.
23. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination / M. Molina, F. Aburto, R. Calder, M. Cazanga, M. Escudey // *Soil and Sediment Contamination*. – 2009. – V. 18. – P. 497–511.
24. Senesi M., Polemio M. Trace element addition to soil by application of NPK fertilizers // *Fertilizer Research*. – 1981. – V. 2. – P. 289–302.
25. Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д. Геохимическая оценка экологического состояния почв // *Гигиена и санитария*. – 2018. – Т. 97. – № 7. – С. 623–628.
26. Мониторинг содержания мышьяка, свинца, кадмия, цинка и меди в компонентах окружающей среды населенного пункта Шерловая Гора (Восточное Забайкалье) / Е.С. Эпова, М.А. Солонухина, О.В. Еремин, Л.А. Михайлова, О.Г. Алексеева, Н.М. Бурлака, С.Э. Лапа // *Гигиена и санитария*. – 2020. – Т. 99. – № 2. – С. 210–216.
27. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review / J.B. Kowalska, R. Mazurek, M. Gasiorek, T. Zaleski // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2018. – V. 40. – P. 2395–2420.
28. Environmental quality and sources of heavy metals in the topsoil based on multivariate statistical analyses: a case study in Laiwu City, Shandong Province, China / L. Yu, J. Cheng, J. Zhan, A. Jiang // *Natural Hazards*. – 2016. – V. 81. – P. 1435–1445.

Поступила 07.03.2022 г.

Информация об авторах

Панов А.В., доктор биологических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии.

Трапезников А.В., доктор биологических наук, заведующий отделом континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН.

Коржавин А.В., кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник отдела континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН.

Сидорова Е.В., научный сотрудник испытательной лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии.

Корнеев Ю.Н., научный сотрудник испытательной лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии.

UDC 614.77:631.416.8:632.122.1

HEAVY METALS AND ARSENIC IN SOILS IN THE VICINITY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES AND NUCLEAR POWER PLANT (BY THE EXAMPLE OF THE BELOYARSK NPP)

Alexey V. Panov¹,
riar@mail.ru

Elena V. Sidorova¹,
sidelena@yandex.ru

Alexander V. Trapeznikov²,
vera_zar@mail.ru

Yuri N. Korneev¹,
riar@mail.ru

Alexander V. Korzhavin²,
BFS_zar@mail.ru

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology,
109 km, Kiev highway, Obninsk, 249032, Russia.

² Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch,
202, 8 Marta street, Yekaterinburg, 620144, Russia.

The relevance. Pollution of ecosystems with heavy metals and arsenic is a significant anthropogenic factor that adversely affects humans and biota. In the Sverdlovsk region, where mining and processing of mineral raw materials is carried out, high levels of pollutant emissions from stationary sources, including heavy metals, are noted. The region is also characterized by multicomponent contamination of territories with artificial radionuclides. Since 1964, the Beloyarsk NPP has been in operation in the Sverdlovsk region. The long-term operation of industrial enterprises and radiation hazardous facilities increases the technogenic load on the ecosystems of the Urals.

The main aim of the research is to assess the content of heavy metals and arsenic in the soils of terrestrial ecosystems in the vicinity of industrial enterprises and the Beloyarsk NPP based on environmental monitoring.

Objects. In 2013 and 2019 the soils of natural (meadow) and agricultural (arable land, grassland) ecosystems of the 30-km zone of influence of the Beloyarsk NPP were studied. The content of 17 elements related to I (Pb, Zn, Cd, As, Hg), II (Mo, Cu, Ni, Co, Cr, Sb), III (Sr, Mn, V, W, Ba) hazard classes was studied in the soil cover, as well as iron.

Methods. The assessment of the total content of heavy metals and arsenic in the soil was carried out in the testing laboratory of agroecology of the RIRAE (accreditation certificate RA.RU.513078). To prepare soil samples for measurements, we used the methods of «cold vapor» and «wet ashing» with a MARS-5 microwave system (CEM, USA). The elements in the samples were determined by atomic absorption and plasma emission methods of analysis. For measurements, we used an axial atomic emission (optical) spectrometer with sample atomization in inductively coupled plasma (ICP–OES) Liberty II (Varian, Australia–USA) and a KVANT spectrometer Zeta-1 with the GRG-3.

Results. It is shown that for 2013–2019 the ratio of elements in the soil cover of terrestrial ecosystems in the vicinity of the Beloyarsk NPP was quite stable. According to the decrease in the total content in the soil, heavy metals and arsenic in 2019 were arranged in the following order: Fe (average – 16700 mg/kg) > Mn (879) > Ba (134) > Zn (51) > Ni (35) ≥ Cr (32) ≥ V (30) ≥ Sr (28) > Cu (21) > Pb (12,4) ≥ Co (11,9) > W (6,7) > Sb (2,4) > As (1,7) ≥ Mo (1,5) > Cd (0,2) > Hg (0,01 mg/kg). According to the total accumulation of elements in the soil, terrestrial ecosystems are in the ratio: arable land (18,7 g/kg of soil) > meadows (14,9 g/kg) > virgin land (12,6 g/kg). Such a distinction is due to differences in the content of iron in the soil, the contribution of which to the regional background is 90...95 %. A weak correlation between the content of elements in the soil and the distance from the Beloyarsk NPP (–0,44...0,29 in 2013 and –0,29...0,38 in 2019) showed the absence of significant emissions of toxicants into the environment from the nuclear power plant both as a result of its many years of work, and after the start of operation of the BN-800 reactor. Among the I hazard class pollutants accumulated in the soil, zinc dominates (contribution 76...78 %), lead is in second place (18...21 %). In II hazard class, the main soil pollutants are nickel (45...34 %) and chromium (28...30 %). In III hazard class is dominated by manganese (68...81 %) and barium (14...27 %). It is shown that in 25...63 % of soil samples in the vicinity of the Beloyarsk NPP, the gross nickel content does not correspond to the approximate permissible concentrations established in SanPiN 1.2.3685–21. In addition, in all control plots of meadow ecosystems, the maximum permissible concentration for the content of antimony was exceeded. In 2019, in 4...25 % of soil samples of arable land and meadows, a discrepancy was noted with maximum permissible concentration for manganese, and in 4...11 % of soil samples of arable land, the maximum permissible concentration for arsenic was exceeded. The levels of accumulation in the soil of a number of heavy metals also exceed the regional background of the Sverdlovsk region: for nickel in 25...63 % of soil samples of natural and agricultural ecosystems, for manganese in 10...50 % of soil samples of arable land and meadows. The greatest amount of elements (average 42 %) is accumulated in the 0–5 cm soil layer. The maximum accumulation in the upper soil horizon was noted for cadmium (62 %), arsenic (49 %), and lead (48 %), and the minimum for antimony (29 %) and manganese (28 %). According to the total stock of toxicants in the 0–5 cm soil layer, they are arranged in a row: Cd > As > Pb > Zn > Cu > Mo > Hg > Sr > Ni > Cr > V > W > Co > Ba > Sb > Mn. In deeper horizons (5–10, 10–15 and 15–20 cm) of soil the elements are distributed evenly. Compared to other technogenically-polluted regions of Russia, the results of monitoring the content of heavy metals and arsenic in the soil of the Beloyarsk NPP area show a stable ecological situation. When planning further monitoring studies, it is necessary to pay attention to the behavior of arsenic, nickel, antimony, manganese, cadmium and lead in the soil. The increased content of these toxicants in the soil can lead to their accumulation in agricultural and natural food products.

Key words:

Terrestrial ecosystems, soil cover, anthropogenic impact, pollutants, technogenic contamination, environmental monitoring, hygienic assessment, environmental safety.

REFERENCES

- Teh T., Norulaini N.A.R., Shahadat M., Wong Y., Mohd Omar A.K. Risk assessment of metal contamination in soil and groundwater in asia: a review of recent trends as well as existing environmental laws and regulations. *Pedosphere*, 2016, vol. 26, no. 4, pp. 431–450.
- Qian Y., Gallagher F., Deng Y., Wu M., Feng H. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 23549–23558.
- Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies. *Soil*, 2015, no. 1, pp. 35–46.
- Ettler V. Soil contamination near non-ferrous metal smelters: a review. *Applied Geochemistry*, 2016, vol. 64, pp. 56–74.
- Luo X.S., Yu S., Zhu Y.G., Li X.D. Trace metal contamination in urban soils of China. *Science of the Total Environment*, 2012, vol. 421–422, pp. 17–30.
- Donga R., Jiab Z., Lia S. Risk assessment and sources identification of soil heavy metals in a typical county of Chongqing Municipality, Southwest China. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, vol. 3, pp. 275–281.
- Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review. *International Journal Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17, pp. 3099.
- Zharikova E.A. Assessment of heavy metals content and environmental risk in urban soils. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 164–173. In Rus.
- Utkin V.I., Chebotina M.Ya., Evstigneev A.V., Lyubashevsky N.M. *Osobennosti radiatsionnoy obstanovki na Urale* [Features of the radiation situation in the Urals]. Ekaterinburg, Ural Branch of the RAS Publ., 2004. 150 p.
- Shkuratova I.A., Donnik I.M., Trapeznikov A.V., Isaeva A.G., Verechak N.A., Krivonogova A.S., Baranova A.A. Metodologiya ekologicheskogo monitoringa agrarnykh predpriyatiy v zone Urala [Methodology of monitoring of agrarian enterprises in the Ural]. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2012, vol. 2, no. 94, pp. 60–62.
- Panov A.V., Perevolotskaya T.V. Risk assessment methodology for agroecosystems in the conditions of technogenic pollution. *Agricultural Biology*, 2020, vol. 55, no. 3, pp. 468–480. In Rus.
- Kim R.Y., Yoon J.K., Kim T.S., Yang J.E., Owens G., Kim K.R. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation – a critical review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, vol. 37, pp. 1041–1061.
- sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu. Gosudarstvenny doklad* [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report]. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow State University M.V. Lomonosov Publ., 2021. 864 p.
- Panov A.V., Kuznetsov V.K., Isamov N.N., Geshe I.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V. Assessment of the influence of BN-800 operation on the radioecological situation in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Atomic Energy*, 2021, vol. 129 (5), pp. 297–304.
- Panov A.V., Trapeznikov A.V., Kuznetsov V.K., Korzhavin A.V., Isamov N.N., Geshe I.V. Radioecological monitoring of agroecosystems in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 146–157. In Rus.
- RD 52.18.718–2008. Organizatsiya i poryadok provedeniya nablyudeniy za zagryazneniem pochv toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya* [RD 52.18.718–2008. Organization and procedure for monitoring soil pollution by toxicants of industrial origin]. Obninsk, SO «VNIIGMI-MTsD» Publ., 2008. 72 p.
- GOST 17.4.4.02.2017. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [SS 17.4.4.02.2017 Soils. Methods of sample selection and preparation for chemical bacterial and helminthological analysis]. Moscow, Standardinform Publ., 2018. 21 p.
- PND F 16.1.2.3:3.10–98. Kolichestvenny khimicheskiy analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy soderzhaniya rtuti v tverdykh obektakh metodom atomno-absorbtsionnoy spektrofotometrii (metod «kholodnogo para»)* [PND F 16.1.2.3:3.10–98. Quantitative chemical analysis of soils. Method for performing measurements of mercury content in solid objects by atomic absorption spectrophotometry (cold vapor method)]. Moscow, State Ecology Committee of Russia Publ., 1998. 11 p.
- PND F 16.1.2.3:3.11–98. Kolichestvenny khimicheskiy analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy soderzhaniya metallov v tverdykh obektakh metodom spektrometrii s induktivno-svjazannoy plazmoy* [PND F 16.1.2.3:3.11–98. Quantitative chemical analysis of soils. Method for Measuring Metal Content in Solid Objects by Inductively Coupled Plasma Spectrometry]. Moscow, State Ecology Committee of Russia Publ., 2005. 28 p.
- SanPiN 1.2.3685–21. Gigenicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Moscow, Rospotrebnadzor Publ., 2021. 987 p.
- Ezhegodnik. Zagryaznenie pochv Rossiyskoy Federatsii toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya v 2020 godu* [Yearbook. Soil pollution of the Russian Federation by toxicants of industrial origin in 2020]. Obninsk, FSBI «NPO Typhoon» Publ., 2021. 128 p.
- Chen M., Graedel T.E. The potential for mining trace elements from phosphate rock. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 91, pp. 337–346.
- Molina M., Aburto F., Calder R., Cazanga M., Escudey M. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination. *Soil and Sediment Contamination*, 2009, vol. 18, pp. 497–511.
- Senesi M., Polemio M. Trace element addition to soil by application of NPK fertilizers. *Fertilizer Research*, 1981, vol. 2, pp. 289–302.
- Beznosikov V.A., Lodygin E.D. Geochemical assessment of ecological state of soils. *Hygiene and Sanitation, Russian journal*, 2018, vol. 97, no. 7, pp. 623–628. In Rus.
- Epova E.S., Soloduhina M.A., Eremin O.V., Mihaylova L.A., Alekseeva O.G., Burlaka L.M., Lapa S.E. Monitoring of arsenic, lead, cadmium, zinc, and copper in the environmental components of the Sherlovaya Gora village (Eastern Transbaikalia). *Hygiene and Sanitation, Russian journal*, 2020, vol. 99, no. 2, pp. 210–216. In Rus.
- Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, vol. 40, pp. 2395–2420.
- Yu L., Cheng J., Zhan J., Jiang A. Environmental quality and sources of heavy metals in the topsoil based on multivariate statistical analyses: a case study in Laiwu City, Shandong Province, China. *Natural Hazards*, 2016, vol. 81, pp. 1435–1445.

Received: 07 March 2022.

Information about the authors

- Alexey V. Panov**, Dr. Sc., RAS professor, chief researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology.
Alexander V. Trapeznikov, Dr. Sc., head of department, Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science.
Alexander V. Korzhavin, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science.
Elena V. Sidorova, research worker, Russian Institute of Radiology and Agroecology.
Yuri N. Korneev, research worker, Russian Institute of Radiology and Agroecology.