

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 504.054

DOI: 10.15372/GIPR20250204

С.В. КАКАРЕКА*, Т.И. КУХАРЧИК*, С.Ю. ТАРАСЕНКО**, К.О. РЯБЫЧИН*,
Н.Е. СОСНОВСКАЯ*, Е.В. КОРЗУН***

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
220076, Минск, ул. Скорины, 10, Беларусь, sk001@yandex.ru, tkukharchyk@gmail.com,
ryabychin.ltp.bas@gmail.com, natalisosnov@mail.ru

**Арктический и антарктический НИИ,

199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия, tarasenko@aari.ru

***Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
220072, Минск, ул. Академическая, 27, Беларусь, korzun_egor@tut.by

ОКРАШЕННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ КАК ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ НАУЧНЫХ СТАНЦИЙ В АНТАРКТИКЕ

Приведены результаты изучения содержания тяжелых металлов в пробах почвы и краски, отобранных на белорусской («Гора Вечерняя») и ряде российских научных станций («Беллинсгаузен», «Мирный», «Прогресс», «Новолазаревская») и полевых баз («Молодежная», «Дружная-4»). Исследования выполнены в летние антарктические сезоны 2021/22 и 2022/23 гг. Пробы краски отбирались со старых окрашенных поверхностей зданий/элементов инфраструктуры и заброшенной техники. Отбор проб почвы осуществлялся вблизи зданий с глубины 0–10 или 0–15 см. Содержание тяжелых металлов (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) в пробах твердых субстратов определялось с использованием метода атомно-абсорбционной спектрометрии. Установлено, что в использованных ранее красках содержание свинца в 76 % случаев, цинка — в 60 %, а хрома в 47 % превышает 1000 мг/кг сухого вещества. В 20 % случаев зафиксированы высокие концентрации кадмия (более 10 мг/кг). Выявлен широкий диапазон содержания большинства тяжелых металлов в пробах почв у окрашенных поверхностей с максимальным значением для свинца. Обсуждается состояние окрашенных поверхностей на научных станциях, разрушение покрытий и удаление краски сильными ветрами. Показано, что локальные высокие концентрации тяжелых металлов в антарктических почвах («горячие точки») могут быть обусловлены их выщелачиванием с окрашенных поверхностей и рассеянием фрагментов краски. Обоснована необходимость проведения специальных исследований для количественной оценки влияния лакокрасочных покрытий на содержание тяжелых металлов в почвах антарктических оазисов.

Ключевые слова: антарктические оазисы, сооружения, техника, лакокрасочные покрытия, коррозия.

S.V. KAKAREKA*, T.I. KUKHARCHYK*, S.YU. TARASENKO**, K.O. RABYCHIN*,
N.E. SOSNOVSKAYA*, E.V. KORZUN***

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus,
220076, Minsk, ul. Skoriny, 10, Belarus, sk001@yandex.ru, tkukharchyk@gmail.com,
ryabychin.ltp.bas@gmail.com, natalisosnov@mail.ru

**Arctic and Antarctic Research Institute,

199397, Saint Petersburg, ul. Beringa, 38, Russia, tarasenko@aari.ru

***Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources,
220072, Minsk, ul. Akademicheskaya, 27, Belarus, korzun_egor@tut.by

PAINTED SURFACES AS A SOURCE OF SOIL POLLUTION WITH HEAVY METALS IN AREAS OF SCIENTIFIC STATIONS IN ANTARCTICA

The article presents the results of the study of the heavy metal content in soil and paint samples collected at the Belarusian («Mount Vechernyaya») and a number of Russian scientific stations («Bellingshausen», «Mirny», «Progress», «Novolazarev»).

© 2025 Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Тарасенко С.Ю., Рябычин К.О.,
Сосновская Н.Е., Корзун Е.В.

skaya”) and field bases (“Molodezhnaya”, “Druzhnaya-4”). The studies were carried out in the summer Antarctic seasons of 2021/22 and 2022/23. Paint samples were collected from old painted surfaces of buildings/infrastructure elements and abandoned vehicles. Soil samples were collected near buildings from a depth of 0–10 or 0–15 cm. The content of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) in solid substrate samples was determined using atomic absorption spectrometry. It was found that the content of lead in previously used paints in 76 % of cases, zinc in 60 % of cases, and chromium in 47 % of cases exceeded 1000 mg/kg of dry matter. High concentrations of cadmium (more than 10 mg/kg) were recorded in 20 % of cases. A wide range of measured concentrations of most heavy metals was revealed in soil samples near painted surfaces, with the maximum recorded lead content. The condition of painted surfaces at the research stations, destruction of coatings, and paint removal by strong winds are discussed. It is shown that local high concentrations of heavy metals in Antarctic soils (“hot spots”) can be caused by their leaching from painted surfaces and dispersion of paint fragments. The need for special studies to quantitatively assess the impact of paint coatings on the content of heavy metals in the soils of Antarctic oases is substantiated.

Keywords: Antarctic oases, buildings, vehicles, paint coatings, corrosion.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач при строительстве и функционировании научных станций в Антарктике является предотвращение поступления загрязняющих веществ в окружающую среду и сохранение уникальных полярных экосистем в естественном состоянии. Первые хижины, появившиеся на этом континенте в начале прошлого века, сменились различного рода зданиями и сооружениями, появились трубопроводы и другие элементы инфраструктуры. В настоящее время в Антарктике насчитывается более 80 научных станций и полевых баз, более 40 из которых функционируют круглогодично. Зимой персонал станций составляет около тысячи человек, летом — 5,0–5,5 тыс. Неотъемлемым элементом станций и полевых баз являются резервуары для хранения топлива, бочки и различная техника (вездеходы, тягачи, снегоуборщики, погрузчики, снегоходы и др.). Расположенные преимущественно в свободных ото льда антарктических оазисах, научные станции оказывают многообразное воздействие на состояние природных компонентов, в том числе на почву [1, 2].

Как известно, поступление загрязняющих веществ в почву осуществляется с различными потоками, включая осаждения выбросов от сжигания топлива дизельными генераторами и транспортными средствами, с отходами и сбросами сточных вод, утечками и разливами топлива. Можно предположить, что одним из источников загрязнения почв тяжелыми металлами в антарктических оазисах, как и в других регионах мира, является также коррозия металлов и выветривание окрашенных поверхностей. Известно, что тяжелые металлы используются при производстве лакокрасочных материалов в виде пигментов, сиккативов и других добавок для придания им необходимых декоративных, антикоррозионных и других свойств. В виде примесей они также присутствуют в составе различных видов стали и чугуна. При «старении» краски происходит растрескивание покрытий, отшелушивание и рассеивание их фрагментов, а также выщелачивание тяжелых металлов атмосферными осадками [3]. Проблема загрязнения почв в связи с использованием лакокрасочных материалов, в том числе свинецсодержащих, привлекала внимание специалистов из разных стран [4–6]. Выявлены такие локальные участки почв с высоким содержанием тяжелых металлов в Антарктике, в частности в почвах возле исторической хижины «Дискавери», что обусловлено использованием свинецсодержащих красок и других материалов [7].

В Антарктике сильные ветры в сочетании с переносимыми ледяными кристаллами, а в бесснежных районах и с зернами песка, ускоряют нарушение целостности и последующую абразию защитных покрытий, а также расслоение волокон древесины [8, 9]. В прибрежных зонах коррозия усиливается за счет присутствия морских аэрозолей [10]. На проблемы сохранения исторических объектов в Антарктике в связи с воздействием природных факторов на их состояние указывает Дж. Хьюз [9]. К настоящему времени накоплено достаточно свидетельств о разрушении покрытий зданий и о коррозии металлических изделий, зафиксированных в различные годы в ходе инспекций [11] в рамках Договора об Антарктике. Проблемы коррозии металла в условиях холодного климата, в том числе в Антарктике, рассматриваются в работах [10, 12]. Коррозия металлов как источник загрязнения окружающей среды недавно была детально представлена в работе Е.П. Янина [13].

Несмотря на подтверждение процессов разрушения покрытий в Антарктике, их изучение как источников загрязнения почв пока не получило развития. В этой связи нами поставлена задача определить содержание тяжелых металлов в краске, использованной для покраски зданий/сооружений, элементов инфраструктуры и техники на ряде антарктических станций, а также выявить вероятное загрязнение почв частицами краски.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись в летние антарктические сезоны 2021/22 и 2022/23 гг. в ходе 14-й и 15-й Белорусской и 68-й Российской антарктических экспедиций на станциях «Гора Вечерняя», «Беллинсгаузен», «Новолазаревская», «Прогресс», «Мирный» и полевых базах «Дружная-4», «Молодежная» (рис. 1).

Пробы краски отбирались с внешней стороны деревянных и металлических поверхностей жилых, лабораторно-бытовых зданий, помещений инфраструктуры, старой техники при условии ее растрескивания и отшелушивания. Каждая проба формировалась преимущественно с одного объекта. Исключением стала заброшенная техника на аэродроме в оазисе Вечернем, где из-за сложностей доступа и других факторов сформирована объединенная проба. Всего отобрано 18 проб краски на пяти станциях и полевых базах (табл. 1).

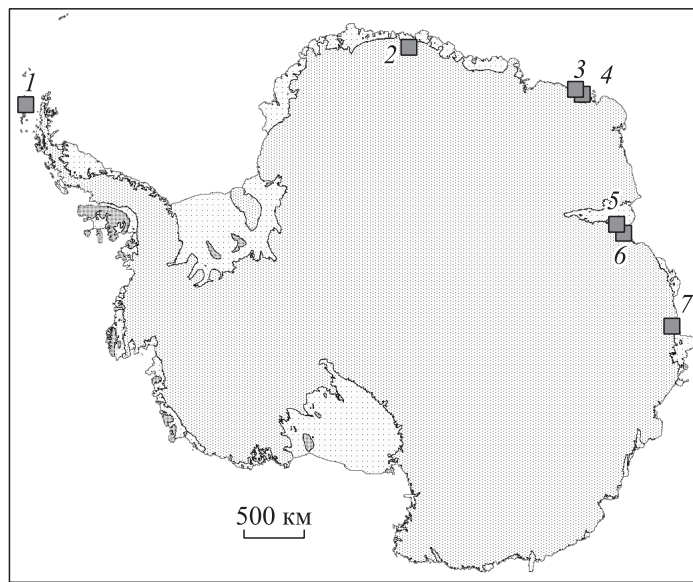


Рис. 1. Схема размещения научных станций и полевых баз, на которых выполнен отбор проб краски и почв в сезоны 2021/22 и 2022/23 гг.:

Станции: 1 — «Беллинсгаузен», 2 — «Новолазаревская», 3 — «Молодежная», 4 — «Гора Вечерняя», 5 — «Дружная-4», 6 — «Прогресс», 7 — «Мирный».

Таблица 1

Общие сведения о пробах краски, отобранных с различных поверхностей на российских и белорусской научных станциях

Станция	Место отбора	Описание пробы
«Гора Вечерняя»	Металлическая опора	Зеленая
	Демонтированные металлические конструкции	Красная
	Металлическая поверхность старой кают-компания	Сине-зеленая
	Стены деревянного пищевого балка	Сине-зеленая
	Старая техника на аэродроме	Коричневая
	Крыша жилого балка	Белая, красная и зеленая с фрагментами ткани
	Тренога с лебедкой	Красно-коричневая
«Прогресс»	Цельнометаллический унифицированный блок (жилой)	Белая и коричневая
	Стены контейнеров дизельных генераторов	Красная краска, местами с металлическими включениями
	Здание старой дизельной электростанции (металлический гараж)	Коричневая и темно-коричневая
«Новолазаревская»	Стены жилого дома	Желтая
	Балок на пляже	Синяя краска на монтажной пене
«Беллинсгаузен»	Вездеход «Пингвин»	Красная
	Здание кают-компания	Красная
«Молодежная»	Здание аэрологии, металл	Красная и зеленая
	Демонтированные конструкции	Сине-зеленая, крупные плотные куски
	Жилой балок	Черная, синяя, зеленая и красная
«Мирный»	Метеорологический пост, металл	Белая и желтая

Также отбирались пробы почв в местах размещения зданий/сооружений при наличии рыхлых отложений. Глубина отбора — до 15 см. Общая характеристика проб почв приведена в табл. 2.

Почвы на станциях и полевых базах фрагментарны, слабо развиты; верхние горизонты представлены щебнисто- и песчано-гравийным или каменисто-щебнистым материалом и по своим свойствам относятся к мерзлотным почвам (Cryosols), согласно Международной классификации почв WRB (2015) [14]. Доля мелкозема (фракция диаметром <1 мм) в почвах на станциях «Гора Вечерняя» и «Прогресс» варьирует от 16,3 до 47,3 %. На станции «Беллинсгаузен» доля мелкозема находится в диапазоне 17,1–87,7 %; повышенная доля мелкозема здесь отмечается вблизи ручья и может быть связана с природными особенностями формирования почв. На станции «Мирный» и полевой базе «Дружная-4» на долю мелкозема приходится около 60 %. Потери при прокаливании для указанных проб варьируют от 0,3 до 2,9 %.

Подготовка проб техногенных субстратов и почв осуществлялась в химико-аналитической лаборатории Института природопользования (Минск, Беларусь) в соответствии с ГОСТ ISO 11464–2015 [15]. Пробы почв высушивались до воздушно-сухого состояния и просеивались с определением доли мелкозема и потерь при прокаливании. При просеивании фиксировались техногенные примеси в почве. Для химико-аналитических исследований использовалась фракция менее 1 мм. Пробы краски измельчались и озолялись.

Определение содержания тяжелых металлов (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) в пробах твердых субстратов осуществлялось с использованием метода атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS) в соответствии с СТБ ИСО 11047-2006 [16]. Использовали атомно-абсорбционный спектрометр ZEEnit 700P (производитель — Analytic Jena GmbH). Концентрацию элементов определяли в экстракте пробы, полученном после ее химического разложения с последовательным использованием сначала 1 М р-ра азотной кислоты (1 М HNO₃) в соотношении 1:1 и затем концентрированной перекиси водорода. В обоих случаях осуществлялось кипячение пробы. Осадок пробы промывали горячей 1 М HNO₃ и после охлаждения разбавляли дистиллированной водой. Результаты измерений содержания тяжелых металлов в пробах краски и почвы приведены в миллиграммах на килограмм сухого вещества.

Пробы, в которых были зафиксированы техногенные примеси при просеивании, исследовались под микроскопом «Микромед VC-4 ZOOM LED» (производитель «Микромед») с использованием видеоокуляра TourCam 5.1MP (производитель — TourCam). Небольшие навески из просеянных проб для фракций размером менее 1 мм и 1–5 мм отбирались в чашку Петри и просматривались под микроскопом с 20- и 40-кратным увеличением. Отмечались размер и цвет выявленных частиц краски. При

Таблица 2

Характеристика проб почв, отобранных на российских и белорусской научных станциях

Станция	Место отбора	Потери при прокаливании, %	Доля фракции <1 мм, %	Наличие включений
«Гора Вечерняя»	В 25 м от старых деревянных конструкций	0,3	16,3	Включения кусочков краски, металлический гвоздь и болт
	Рядом со старой дизельной электростанцией	1,2	36,5	Включения древесной щепы, краски, металла
	В 10 м от 8-секционного лабораторно-жилого модуля	0,3	47,3	Не обнаружено
	В 10 м от 3-секционного лабораторно-жилого модуля	0,8	43,5	Мелкие рыжие и белые перья
	В 15 м от контейнера-рефрижератора	0,4	40,0	Фрагменты краски
«Прогресс»	Рядом с инсинераторным комплексом	1,0	37,7	Фрагменты древесины, кабеля и проволоки
«Мирный»	Вершина сопки Комсомольской	1,5	58,3	Фрагмент керамической плитки (1 × 2 см)
«Дружная-4»	Возле банной емкости	1,6	57,7	Не обнаружено
«Беллинсгаузен»	Возле очистной установки на берегу ручья	0,7	25,8	Волокно белого цвета
	Возле балка	1,0	17,1	Не обнаружено
	У нижнего ангара, со стороны ручья	2,9	87,8	Несколько включений темного цвета (пластик, краска)

этом не ставилась задача количественной их оценки, поскольку для этого требуется применение других методов (включая флотацию, центрифугирование, фильтрацию).

Помимо результатов химико-аналитических и микроскопических исследований, использованы опубликованные данные в отчетах инспекций, проводимых в соответствии со ст. 7 Договора об Антарктике и ст. 14 Протокола по охране окружающей среды. Отчеты размещены в базе данных на сайте Секретариата Договора об Антарктике [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание тяжелых металлов в пробах краски. Результаты исследований показали, что в пробах краски, взятых с различных поверхностей в Антарктике, содержание тяжелых металлов значительно варьирует (табл. 3). По абсолютным значениям среди металлов доминируют свинец и цинк, средние концентрации которых оцениваются в десятки грамм на килограмм сухого вещества.

Содержание свинца в 76 % случаев превышает 0,1 % от массы сухого вещества (или 1000 мг/кг). Данный показатель повышен в 60 % случаев в отношении цинка и в 47 % — хрома. В 20 % случаев зафиксированы высокие концентрации кадмия (более 10 мг/кг). Повышенные концентрации меди (в диапазоне 100–1000 мг/кг) отмечены в двух случаях, или в 13 % от общего числа проб. Что касается никеля, то при максимальном значении 43,7 мг/кг в 73 % случаев его концентрации составляли менее 10 мг/кг сухого вещества.

Между содержанием тяжелых металлов в пробах краски связи не выявлено, за исключением свинца и хрома, хотя коэффициент аппроксимации невысок ($R^2 = 0,27$). Это объясняется, с одной стороны, тем, что использованные краски в зависимости от их назначения различались по составу. В частности, в цинксодержащих грунтовках концентрация цинка, в соответствии с ГОСТ на лакокрасочные материалы [17], составляет 94–96 % массы сухого вещества. С другой стороны, взятые пробы зачастую сформированы из нескольких слоев лакокрасочных материалов, включая грунтовки, которыми неоднократно покрывались поверхности. Не исключено, что со временем окрашенные поверхности изменились не только за счет абразии, но и процессов выщелачивания химических элементов, что подтверждается исследованиями [3].

Сравнение концентраций тяжелых металлов в красках, отобранных с разных поверхностей, показало, что содержание цинка в 14 раз, а никеля в 4 раза выше в краске с металлических поверхностей по сравнению с деревянными (рис. 2). Содержание меди и свинца оказалось в среднем выше в пробах краски с деревянных поверхностей в 3,4 и 2,3 раза.

Установлено, что наиболее высокие концентрации цинка (4,2–5,4 % массы сухого вещества) характерны лишь для металлических поверхностей зданий, тогда как свинца (1,4–4,0 %) — и для металлических, включая поверхности старой техники, и для деревянных.

В пробах, взятых со старой техники (грузовые автомобили, снегоуборочный трактор, вездеход), средние концентрации тяжелых металлов, за исключением цинка, оказались выше по сравнению с окрашенными поверхностями зданий и сооружений.

Не выявлено ожидаемой зависимости содержания тяжелых металлов от цвета краски, поскольку в большинстве случаев пробы представлены двумя и более слоями краски. В любом случае полученные данные характеризуют окрашенные поверхности как вторичный потенциальный источник поступления тяжелых металлов в окружающую среду.

Содержание тяжелых металлов в почвах. Приведенные в табл. 4 данные свидетельствуют о широком диапазоне замеренных концентраций в почвах свинца (от 4,9 до 1378 мг/кг), цинка (от 18,5

Таблица 3

Основные статистические параметры содержания тяжелых металлов в пробах краски, отобранных на российских и белорусской научных станциях

Параметр	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Минимум, мг/кг	0,1	11,5	1,6	0,7	4,8	14
Максимум, мг/кг	30,6	3777	340,4	43,7	40 215	53 636
Среднее, мг/кг	4,93	1202,0	44,0	8,9	10 623	9783
Медиана, мг/кг	1,95	1588	13,8	6,1	5925,3	1076,0
Стандартная ошибка, мг/кг	2,15	979,5	22,7	2,9	3083,4	4782,2
Коэффициент вариации, %	168	108	200	125	123	189

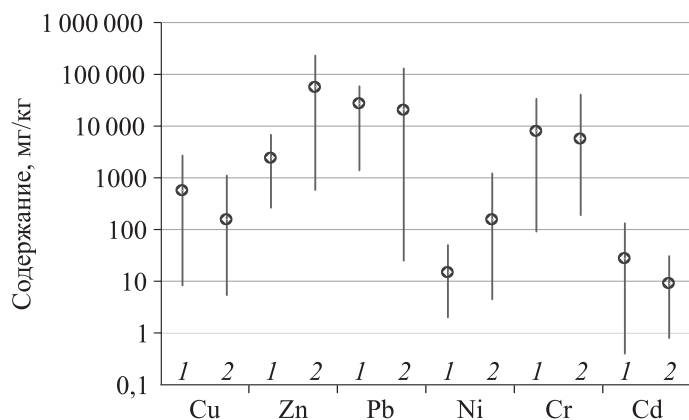


Рис. 2. Диапазон и среднее содержание тяжелых металлов в пробах краски, отобранных с деревянных (1) и металлических (2) поверхностей в Антарктике, мг/кг.

Кружком показано среднее содержание тяжелых металлов.

до 512), меди (от 5,8 до 84,6), хрома (2,4–36,4 мг/кг), в меньшей степени кадмия (от 0,37 до 1,40 мг/кг) и никеля (от 2,6 до 23,8 мг/кг). Максимальные значения свинца, цинка и кадмия выявлены в пробах почв, отобранных на станции «Гора Вечерняя», меди — на станции «Прогресс», хрома — на станции «Мирный». Близкие к максимальному значению отмечаются концентрации меди в почве на станции «Беллинсгаузен»; здесь же повышено содержание кадмия и цинка.

Учитывая географические различия местоположений станций (на о. Кинг-Джордж (Ватерлоо), в оазисах Вечернем и Холмы Ларсеманн, берегах Правды и Ингрид Кристенсен), можно ожидать и различный уровень содержания тяжелых металлов, обусловленный природными факторами: геолого-геоморфологическими, литологическими, климатическими, биотическими и другими [18–20]. Однако различия фоновых концентраций тяжелых металлов между оазисами, как правило, находятся в пределах одного порядка величин. Применительно же к решению поставленных задач наибольший интерес представляют максимальные зафиксированные значения или значения, значительно превышающие фоновые либо кларк литосферы.

По отношению к местному фону максимальное содержание свинца на станции «Гора Вечерняя» превышено почти в 300 раз, цинка — в 13, кадмия — в 6 раз. На станции «Прогресс» фоновые значения меди превышены в 8 раз, свинца — в 2 раза; на станции «Беллинсгаузен» фоновые значения

Таблица 4

**Содержание тяжелых металлов в почвах вблизи окрашенных зданий
на территории белорусской и российских научных станций, мг/кг сухого вещества**

Район, оазис	Место отбора (количество проб)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Источник
Земля Эндерби, оазис Вечерний	Станция «Гора Вечерняя» (5)	0,37–1,40	3,80–14,0	12,5–53,1	5,4–10,8	4,9–1378	18,5–512,0	Данные авторов [21]
	То же, фоновые территории (6)	Н.о. — 0,22	4,6–20,0	9,0–30,0	1,2–50,0	Н.о. — 4,6	10,3–40,0	
Земля Принцессы Елизаветы, Холмы Ларсеманн	Станция «Прогресс» (1)	0,54	14,5	84,6	11,4	32,4	54,7	Данные авторов [19]
	За пределами станции (19)	—	108	19	19	26	36	
	Фоновые	—	34,0	10,1	—	15,1	48,9	
Земля Королевы Мэри, берег Правды	Станция «Мирный» (1)	0,86	36,4	44,6	23,8	38,7	74,8	Данные авторов
Земля Принцессы Елизаветы, берег Ингрид Кристенсен, утес Лендинг	Полевая база «Дружная-4» (1)	0,83	2,4	5,8	2,6	12,0	75,7	То же
Южные Шетландские острова, остров Кинг-Джордж (Ватерлоо)	Станция «Беллинсгаузен» (3)	0,88–1,02	6,3–20,5	52,5–63,9	9,5–22,1	11,9–19,6	46,5–184,6	То же
	Фоновые для п-ова Файлдс	0,37	22,6	89,4	10,4	5,4	51,4	
Кларк литосферы		0,09	92	28	47	17	67	[23]

Примечание. Н.о. — содержание ниже предела обнаружения метода. Прочерк — данные отсутствуют.

кадмия — в 3 раза, свинца и цинка — в 3,6 раза. По отношению к кларку литосферы на станции «Мирный» повышено содержание кадмия в 9 раз и свинца в 2,3 раза. Ограниченное количество проб не позволяет оценить пространственные особенности загрязнения, хотя, скорее всего, речь идет о локальном проявлении загрязнения.

Содержание частиц краски в почве. Частицы краски, а также другие техногенные примеси (кусочки древесины, фрагменты корродированного металла и др.) были визуальным образом обнаружены в ряде проб при их просеивании. Микроскопический анализ подтвердил наличие частиц краски во фракциях почв размером менее 1 мм и 1–5 мм в четырех пробах, взятых на станции «Гора Вечерняя» вблизи старых, частично законсервированных или используемых зданий, построенных около 40 лет назад. При этом в пробах почв обнаружены частицы неправильной формы бирюзовой, желтой, красной, синей краски, красной краски на белой грунтовке. Присутствуют частицы, обладающие блестящим эффектом (бирюзового и красного цвета). Кроме того, обнаружены частицы железа и древесной щепы. Частицы краски выявлены также при микроскопическом анализе проб со станций «Прогресс», «Беллинсгаузен» и «Мирный». Некоторые примеры частиц краски в почве приведены на рис. 3.

Следует отметить, что частицы краски в почве зафиксированы нами ранее в оазисе Вечернем при изучении микропластика [24]. Выявлены они также в пробах почвы на п-ове Файлдс [25].

Приведенные данные подтверждают рассеяние старой краски и корродированного металла и их поступление в почву.

Регламентация содержания тяжелых металлов в красках. В целом полученные данные свидетельствуют о высоких концентрациях свинца, цинка и хрома в использованных ранее красках, отобранных с различных поверхностей и материалов. При этом отсутствуют пробы красок, «чистые» в отношении всех тяжелых металлов по сравнению с почвой: превышение обнаружено по одному или нескольким элементам. Кратность превышения свинца и цинка в краске достигает 2–3 порядков величин, хрома — 2, кадмия — 1–2 порядков.

Следует отметить, что зафиксированные уровни содержания тяжелых металлов в красках значительно выше принятых к настоящему времени во многих странах допустимых норм. Однако установленные предельные значения в основном касаются красок для потребительских целей, в частности используемых для нанесения декоративных покрытий в жилых зданиях, помещениях и некоторых других категориях применения. Гораздо реже пределы устанавливаются для красок промышленного использования для покраски сооружений и конструкций, автомобилей и другой техники, дорожной разметки. Например, в США содержание свинца в красках, предназначенных для потребительского использования, с 2009 г. не должно превышать $90 \text{ млн}^{-1} \text{ (ppm)}$ [26]; в то же время до сих пор отсутствуют федеральные нормы содержания свинца в красках для промышленного использования [27].

В Европе предложение о полном запрете использования карбоната и сульфата свинца в красках было внесено еще в 1988 г. В 1999 г. в соответствии с Директивой 1999/45/ЕС [28] был установлен порядок маркировки красок и лаков, содержащих более 0,15 % свинца от массы краски (предупреждение о невозможности использования в местах, используемых детьми). Директивой ЕС по ограничению опасных веществ в 2003 г. установлен верхний предел содержания свинца в красках, равный 0,1 %, с постепенным отказом от использования данного тяжелого металла при производстве лакокрасочной продукции.

В странах бывшего СССР нормы содержания свинца в красках (кроме красок для внутренних малярных работ) также введены в новом тысячелетии. Так, в России, в соответствии с ГОСТ Р 51691–2008 [29], запрещено содержание в эмалях ртути, кадмия и мышьяка (допускается применение кадмия только в эмалях, предназначенных для окрашивания транспорта); содержание же в эмали свинцовых пигментов допускалось в количестве до 1 %; по новому ГОСТ 33290–2023 [30], содержание свинца (и других веществ 1-го класса опасности) не должно превышать 0,5 %.

Согласно проекту Технического регламента Таможенного союза «О безопасности лакокрасочных материалов», в составе лакокрасочных материалов для окрашивания жилых и(или) общественных помещений запрещается применять ртуть, мышьяк, свинец, кадмий и их соединения, а также соединения шестивалентного хрома. Лакокрасочные материалы не должны содержать сиккативов, включающих металлы, химических веществ, относящихся к 1-му классу опасности, количество которых в пересчете на сухой остаток превышает 0,5 %, свинецсодержащих пигментов — количество которых превышает 15 %, тетраоксихромата цинка — 10 % от веса нелетучей части лакокрасочных материалов.

Рассматривая регламентацию содержания тяжелых металлов в красках, следует иметь в виду, что стандарты, ограничивающие их концентрацию, были приняты уже после периода активного строительства антарктических станций и полевых баз. К настоящему времени все обследованные станции

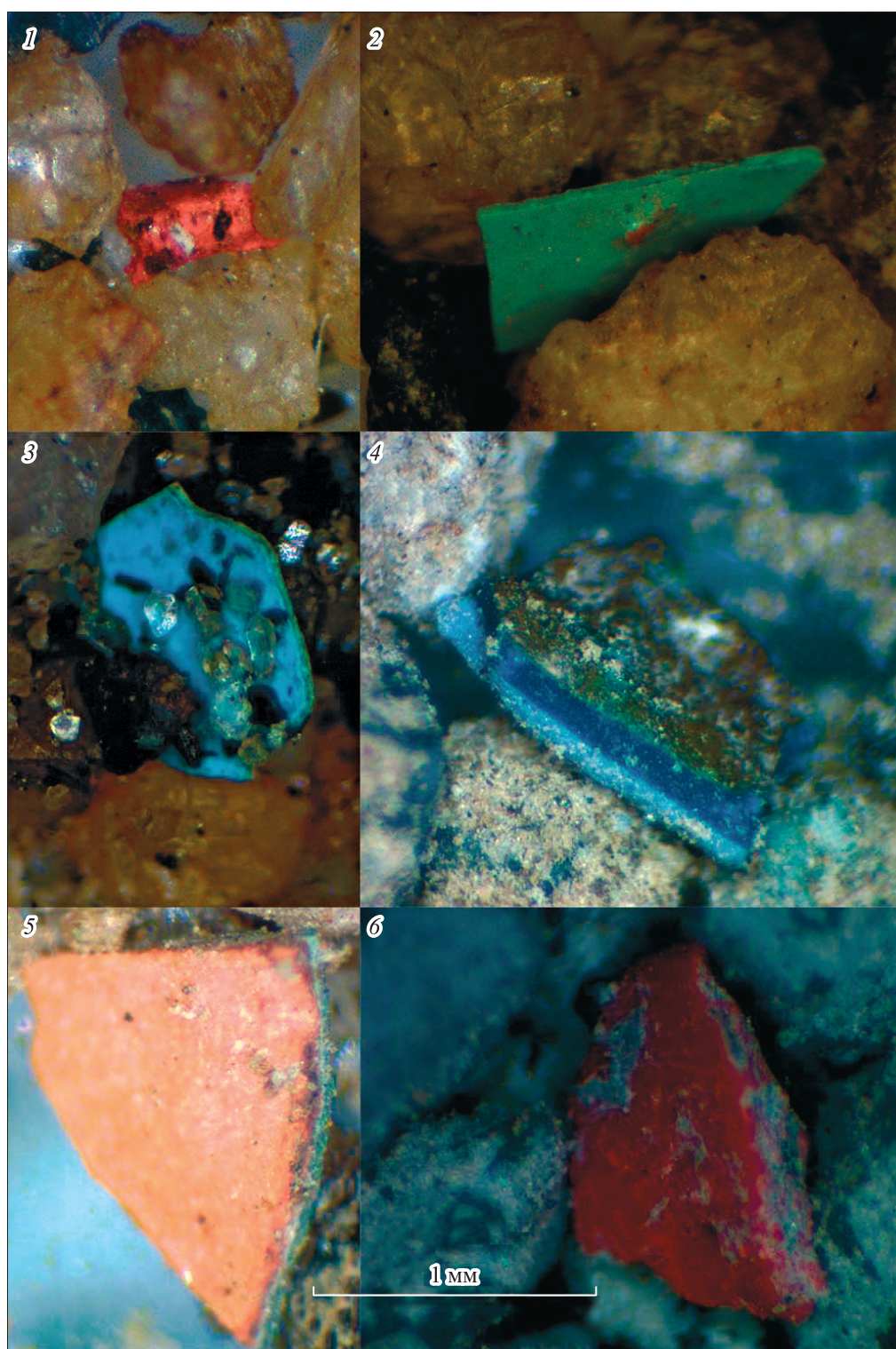


Рис. 3. Примеры частиц краски, обнаруженных на станциях в пробах почв во фракции менее 1 мм.

«Гора Вечерняя»: 1 — проба в 10 м от 8-секционного лабораторно-жилого модуля, 2 — проба в 25 м от старых деревянных конструкций, 3 — проба рядом со старой дизельной электростанцией, 4 — проба в 15 м от контейнера-рефрижератора. «Беллинсгаузен»: 5 — проба у нижнего ангара, со стороны ручья. «Прогресс»: 6 — проба рядом с инсинераторным комплексом.

и полевые базы эксплуатируются десятки лет: «Мирный» — с 1956 г., «Новолазаревская» — с 1961, «Молодежная» — с 1962, «Беллинсгаузен» — с 1968, «Дружная-4» — с 1987, «Прогресс» — с 1988 г. Это означает, что могли использоваться лакокрасочные материалы с различным содержанием тяжелых металлов. Более того, свинцовый сурик, обладающий высокими антикоррозийными свойствами, широко использовался ранее в качестве грунта для защиты стали в особо тяжелых с точки зрения коррозии условиях: в судостроении, отчасти — в автомобилестроении и ремонте автомобилей. Имеются подтверждения применения свинцово-цинковых лакокрасочных материалов в историческом прошлом при освоении Антарктики [7]. Что же касается цинка, то его широкое использование при производстве лакокрасочных материалов стандартами не ограничивается. Цинк является основой многих грунтовок для защиты металлов от коррозии, особенно в производстве автомобилей, резервуаров и емкостей для топлива, в том числе стальных 200-литровых бочек, широко используемых в Антарктике.

Разрушение окрашенных поверхностей и коррозия металла. Даже если в условиях Антарктики использовались устойчивые к коррозии и разрушению материалы, то за прошедшие десятилетия после строительства ледяные зерна, местами в сочетании с частицами грунта, переносимые сильными, в том числе ураганскими, ветрами, действовали как эффективный абразивный материал. Более быстрому разрушению покрытий в прибрежных районах Антарктики способствуют присутствующие здесь в атмосферном воздухе морские аэрозоли, содержащие хлориды и сульфаты с наиболее высокой коррозионной активностью [12].

К настоящему времени практически на всех станциях имеется неиспользуемая (не вывезенная за пределы Договора об Антарктике) техника, старые емкости для хранения топлива, заброшенные (неиспользуемые) здания/сооружения. В случае если они не погребены полностью или частично снегом, то их коррозия и разрушение продолжаются.

В особенности это касается не используемых длительное время зданий, как, например, на полевых базах «Союз» и «Молодежная» (инспекции 2010 и 2020 гг.), первых зданий на станции «Вернадский» (2019 г.), хижин на о. Нельсон и уже демонтированных строений на станции «Чанчэн» (2016 г.), хижин на п-ове Файлдс, исторических мест на базе «Стонингтон-Айленд» (База Е), расположенной на о. Стонингтон (залив Маргерит). Часто краска на таких зданиях отсутствует вовсе. Отслаивание краски отмечено во время инспекции на пустующей станции «Лейтенант Руперто-Эличирибети» (2005 г.). Корродируют металлические контейнеры, используемые для различных целей, емкости для хранения топлива и бочки (2009 г.). Согласно одному из отчетов в рамках инспекций по Договору об Антарктике в 2005 г., были выявлены сильно корродированные емкости с признаками утечек топлива. Некоторые примеры разрушения окрашенных поверхностей и коррозии емкостей приведены на рис. 4.

За время функционирования станций происходили их неоднократные обновления, которые включали как ремонт уже имеющихся зданий, так и строительство новых модулей. Современные модульные системы, используемые при строительстве на антарктических станциях, разработаны с применением новых технологий на основе накопленного опыта. Изменился и состав красок с учетом введенных стандартов. Так, в металлических композитных панелях (Metal Composite Panels) внешняя облицовка выполнена из оцинкованной листовой стали с покрытием, обладающим устойчивостью к коррозии, ветру, снегу и сильному холоду [31]. Такие панели использованы на станциях «Командан-ти-Феррас», «Ноймайер III», «Бхарати», а также для складских помещений на объектах «Дюмонд-Юрвиль», «Жанг Бого» и др. На станции «Гора Вечерняя» наружная обшивка новых 3- и 8-секционных модулей также представлена оцинкованной сталью с полимерным покрытием. Можно ожидать, что срок службы таких покрытий будет больше по сравнению с окрашенными поверхностями старых зданий, и, соответственно, поток загрязняющих веществ, поступающих при разрушении краски, снизится.

Влияние окрашенных поверхностей на загрязнение почв. Выявленные локальные высокие уровни загрязнения ряда проб почвы на станции «Гора Вечерняя», а также повышенные их содержания на станциях «Прогресс», «Мирный», «Беллинсгаузен», вероятно, обусловлены в том числе поступлением фрагментов краски с окрашенных поверхностей.

Влияние использования в прошлом свинец- и цинкосодержащих лакокрасочных материалов на загрязнение почв выявлено при изучении состояния исторических хижин на о. Росса: содержание свинца достигало 196–1621 мг/кг, цинка — 125–1083 мг/кг [7]. Авторами подтверждены высокие



Рис. 4. Примеры разрушения окрашенных поверхностей зданий и корродированных топливных емкостей по данным инспекций по Договору об Антарктике [11].

1 — здание на станции «О’Хиггинс», построенное в 1948 г. (2006 г.); 2 — здания на полевой базе «Союз» (2010 г.); 3 — демонтированные для вывоза из Антарктики здания на станции «Чанчэн» (2016 г.); 4 — одно из зданий на полевой базе «Молодежная» (2020 г.); 5 — сильно корродированные и протекающие топливные баки на одной из станций (2005 г.); 6 — резервуар на 1000 м³ топлива на станции «Беллинсгаузен» (2005 г.).

уровни содержания указанных элементов в окрашенных деревянных внутренних деталях хижин и внешних покрытиях. Отчасти со сгоранием окрашенных поверхностей и других материалов связаны экстремально высокие концентрации тяжелых металлов в почвах на месте британской станции «Хоп Бей» (пожар в 1948 г.) и бразильской станции «Команданти-Феррас» (пожар в 2012 г.) [32, 33]. Содержание свинца в пробах почв здесь достигало 13,7–19,4 г/кг, цинка — 42,2 г/кг, меди — 34 г/кг, кадмия — 50 мг/кг. Выполненные недавно исследования в Северной Каролине (США) показали, что на месте разрушенных или сгоревших конструкций формируются «горячие» точки с очень высокими уровнями загрязнения почв [34].

Согласно [20], источником свинца в районе расположения станций в оазисе Холмы Ларсеманн может быть истирание бочек/контейнеров с топливом и красок. Не исключены и другие источники загрязнения. Так, повышенные уровни тяжелых металлов в почвах в районе п-ова Файлдс авторы объясняют влиянием топлива [18].

В целом, учитывая большое количество типов окрашенных поверхностей на станциях и полевых базах в антарктических оазисах (наружные и внутренние поверхности жилых, производственных и служебных зданий, поверхности резервуаров для хранения топлива, бочки с топливом, эстакады, трубопроводы, столбы, другие сооружения и техника) и их рассредоточенность, можно ожидать практически повсеместного рассеяния фрагментов краски или металлических корродированных материалов. Аккумуляция таких частиц в почвах или их вынос будут определяться свойствами рыхлых отложений, их дисперсностью, местоположением в рельефе и другими природными факторами. Важную роль играют поверхностный сток, направление и скорости ветра.

Несомненно, для оценки влияния лакокрасочных покрытий на содержание тяжелых металлов в почвах антарктических оазисов потребуются специальные исследования. Ранее для условий Беларуси было установлено, что при отборе приповерхностных проб почв (0–2 или 0–5 см) у стен зданий и(или) под заборами с осыпающейся краской содержание свинца и цинка достоверно выше по сравнению с пробами, взятыми на некотором удалении от них [6]. Так, максимальные различия в содержании свинца у окрашенной стены и на расстоянии более 10 м достигали 22 раз, цинка — 9, кадмия — 11 раз. На быстрое понижение концентраций свинца с удалением от окрашенных поверхностей, измеряемым несколькими метрами, указано в работе [34].

Вместе с тем отбор проб почв в условиях Антарктики с привязкой к источникам загрязнения сдерживается особенностями почвенного покрова, прежде всего фрагментарностью развития рыхлых отложений. Сооружения станций часто размещаются на выходах скалистых пород. Кроме того, сложности могут возникнуть с формированием снежных наносов у зданий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые на ряде научных станций и полевых баз, расположенных в оазисах Вечернем, Молодежном, Холмы Ларсеманн, на о. Кинг-Джордж (Ватерлоо), берегах Правды и Ингрид Кристенсен, выполнены исследования с отбором проб старой краски и почв вблизи окрашенных поверхностей. Установлено, что старые краски, отобранные с деревянных и металлических поверхностей, включая заброшенную технику, содержат тяжелые металлы, концентрации которых на порядок или несколько порядков превышают таковые в почвах. Показаны различия в содержании свинца и цинка в красках, взятых с разных поверхностей.

По результатам микроскопического анализа подтверждено присутствие частиц краски в почве в районах размещения станций. Приведены примеры разрушения покрытий старых зданий/сооружений и коррозии металлических поверхностей в различных оазисах Антарктиды.

Для количественной оценки влияния лакокрасочных покрытий на содержание тяжелых металлов в почвах антарктических оазисов необходимы специальные исследования. Для этого в первую очередь следует оценить объемы использования лакокрасочных материалов на станциях и полевых базах — как уже содержащихся в зданиях/сооружениях и технике, так и ежегодно завозимых с новыми сооружениями и техникой, а также для ремонтных и восстановительных работ. Необходимо учитывать, что определенная часть старых лаков и красок в покрытиях вывозится ежегодно из Антарктики с техникой и отходами. Однако, принимая во внимание высокую стоимость и сложность вывоза отходов за пределы зоны действия Договора об Антарктике, процесс этот весьма медленный.

Работа выполнена в рамках подпрограммы «Развитие деятельности Белорусской антарктической станции» Государственной программы «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021–2025 гг. (20213657).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bargagli R.** Environmental contamination in Antarctic ecosystems // *Science of the Total Environment*. — 2008. — Vol. 400. — P. 212–226.
2. **Brooks S.T., Jabour J., Hoff J. van den, Bergstrom D.M.** Our footprint on Antarctica competes with nature for rare ice-free land // *Nature Sustainability*. — 2019. — N 2. — P. 185–190.

3. **Karlen C., Wallinder I.O., Heijerick D., Leygraf C., Janssen C.R.** Runoff rates and ecotoxicity of zinc induced by atmospheric corrosion // *The Science of the Total Environment*. — 2001. — Vol. 277. — P. 169–180.
4. **Horner J.M.** Lead in house paints — Still a health risk that should not be overlooked. — 2004 [Электронный ресурс]. — http://www.cieh.org/jehr/lead_house_paints.html (дата обращения 15.05.2024).
5. **Козыренко М.И., Кухарчик Т.И.** Загрязнение почв тяжелыми металлами у окрашенных поверхностей: результаты изучения на примере г. Лиды // *Природопользование*. — 2014. — № 26. — С. 54–59.
6. **Marcus J., McBratney A.B.** A Review of the contamination of soil with Lead. Origin, occurrence and chemical form of soil lead // *Progress in Environmental Science*. — 2000. — N 2. — P. 291–318.
7. **Blanchette R.A., Held B.W., Jurgens J.A., Aislabie J., Duncan S., Farrell R.L.** Environmental pollutants from the Scott and Shackleton expeditions during the 'Heroic Age' of Antarctic exploration // *Polar Record*. — 2004. — N 213. — P. 143–151.
8. **Blanchette R., Held B., Farrell R.** Defibration of wood in the expedition huts of Antarctica: An unusual deterioration process occurring in the polar environment // *Polar Record*. — 2002. — N 38. — P. 313–322.
9. **Hughes J.** Deterioration Processes affecting historic sites in Antarctica and the conservation implications. — Canberra: University of Canberra, 2011. — 190 p.
10. **Mikhailov A.A., Strekalov P.V., Panchenko Y.M.** Atmospheric corrosion of metals in regions of cold and extremely cold climate (a review) // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. — 2008. — N 44. — P. 644–659.
11. **Inspections** database, 2024 [Электронный ресурс]. — <https://www.ats.aq/-devAS/Ats/InspectionsDatabase> (дата обращения 15.05.2024).
12. **Maxwell P., Viduka A.** Antarctic observations: On metal corrosion at three historic huts on Ross Island // *Proceedings of Metal*. — Canberra: National Museum of Australia Canberra, 2004. — P. 484–500.
13. **Янин Е.П.** Коррозия как источник загрязнения окружающей среды. — М.: НП «АПСО», 2020. — 112 с.
14. **IUSS Working Group WRB.** World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports*, N106. — Rome: FAO, 2015. — 203 p.
15. **ГОСТ ISO 11464–2015.** Качество почвы. Предварительная подготовка проб для физико-химического анализа. — М.: Стандартинформ, 2015. — 16 с.
16. **СТБ ИСО 11047–2006.** Качество почвы. Определение содержания кадмия, хрома, кобальта, меди, свинца, марганца, никеля и цинка, экстрагированных царской водкой из почвы. Пламенный и электротермический методы атомно-абсорбционной спектрометрии. — Минск: Госстандарт, 2006. — 24 с.
17. **ГОСТ 9.307–2021.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля. — Минск: Госстандарт, 2022. — 31 с.
18. **Amaro E., Padeiro A., Ferro A.M. de, Mota A.M., Leppe M., Verkulich S., Hughes K., Peter H.-U., Canario J.** Assessing trace element contamination in Fildes Peninsula (King George Island) and Ardley Island, Antarctic // *Marine Pollution Bulletin*. — 2015. — N 97. — P. 523–527.
19. **Shi G., Teng J., Ma H., Wang D., Li Y.** Metals in topsoil in Larsemann Hills, an ice-free area in East Antarctica: Lithological and anthropogenic inputs // *CATENA*. — 2018. — Vol. 160. — P. 41–49.
20. **Xu Q., Chu Z., Gao Y., Mei Y., Yang Z., Huang Y., Yang L., Xie Z., Sun L.** Levels, sources and influence mechanisms of heavy metal contamination in topsoils in Mirror Peninsula, East Antarctica // *Environmental Pollution*. — 2020. — Vol. 257. — P. 113552.
21. **Kukharchyk T., Kakareka S., Giginyak Yu.** Trace elements in soils of oases of Enderby Land (on an example of Vecherny Oasis) // *Czech Polar Reports*. — 2018. — Vol. 8 (2). — P. 162–177.
22. **Pereira J.L., Pereira P., Padeiro A., Goncalves F., Amaro E., Leppe M., Verkulich S., Hughes K.A., Peter H.U., Canário J.** Environmental hazard assessment of contaminated soils in Antarctica: Using a structured tier 1 approach to inform decision-making // *Science of the Total Environment*. — 2017. — Vol. 574. — P. 443–454.
23. **Rudnic R.L., Gao S.** Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. — 2003. — Vol. 3. — P. 1–64.
24. **Kukharchyk T.I., Kakareka S.V., Rabychny K.O.** Microplastics in soils of the Thala Hills, East Antarctica // *Eurasian Soil Science*. — 2024. — Vol. 57, N 3. — P. 502–512.
25. **Perfetti-Bolaco A., Araneda A., Mucoz K., Barra R.O.** Occurrence and distribution of microplastics in soils and intertidal sediments at Fildes Bay, Maritime Antarctica // *Frontiers in Marine Science*. — 2022. — Vol. 8. — P. 774055.
26. **Code of Federal Regulations.** Title 16 Chapter II Subchapter B Part 1303 § 1303.1 [Электронный ресурс]. — <https://www.ecfr.gov/current/title-16/chapter-II/subchapter-B/part-1303/section-1303.1> (дата обращения 10.06.2024).
27. **Gottesfeld P.** Time to ban lead in industrial paints and coatings // *Front Public Health*. — 2015 [Электронный ресурс]. — <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4434842/> (дата обращения 10.06.2024).
28. **Directive 1999/45/EC** of the European Parliament and of the Council of 31 May 1999 concerning the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to the classification, packaging and labelling of dangerous preparations // *Official Journ. of the European Communities* [Электронный ресурс]. — <https://www.icqc.eu/userfiles/File/1999-45-EC.pdf> (дата обращения 20.08.2024).
29. **ГОСТ Р 51691–2008.** Материалы лакокрасочные. Эмали. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2009. — 15 с.

30. **ГОСТ 33290–2023.** Материалы лакокрасочные, применяемые в строительстве. Общие технические условия. — М.: Изд-во Росс. ин-та стандартизации, 2023. — 20 с.
31. **McMurdo** station modernization study. Building Shell & Fenestration Study. April 29, 2016 Final Submittal [Электронный ресурс]. — https://future.usap.gov/core_rfp/McMurdo%20Station%20Building%20Shell%20Pre-Design%20FINAL%20Report.pdf (дата обращения 27.05.2024).
32. **Guerra M.B.B., Lima Neto E., Prianti M.T.A., Pereira-Filho E.R., Schaefer C.E.G.R.** Post-fire study of the Brazilian Scientific Antarctic Station: Toxic element contamination and potential mobility on the surrounding environment // Microchemical Journ. — 2013. — Vol. 110. — P. 21–27.
33. **Guerra M.B.B., Schaefer E.C.G.R., Rosa P.F., Simas F.N.B., Pereira T.T.C., Pereira-Filho E.R.** Heavy metals contamination in century-old manmade technosols of Hope Bay, Antarctic Peninsula // Water, Air, & Soil Pollution. — 2011. — Vol. 222. — P. 91–102.
34. **Skinner A., Lambert C.** Legacies of lead paint contamination in the mineral soils adjacent to historic buildings: Master's project / Duke University [Электронный ресурс]. — <https://hdl.handle.net/10161/27238> (дата обращения 20.05.2024).

Поступила в редакцию 08.07.2024

После доработки 06.11.2024

Принята к публикации 10.03.2025