

ЭКОЛОГИЯ, БИОЦЕНОЛОГИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ ECOLOGY, BIOCENOLOGY AND BIOGEOGRAPHY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-184-200>

УДК 631.4



Орнитогенные почвы Берега Правды и архипелага Хасуэлл, Восточная Антарктида: морфологическое строение и биогеохимические особенности

И.И. Алексеев^{1,2✉}, Е.Н. Грек^{1,3}, А.А. Четверова¹

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск, Россия

³ ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

✉ i.alekseev@aari.ru

 ИИА, 0000-0002-0512-3849; ЕНГ, 0000-0002-5515-4686; ААЧ, 0000-0001-7461-3617

Аннотация. В условиях продолжающегося расширения человеческого присутствия в Антарктике важным представляется более эффективное осуществление широкого круга мер с целью всесторонней защиты окружающей среды, а также соблюдения фундаментальных принципов системы Договора об Антарктике. Почвы являются важнейшими компонентами всех наземных экосистем и играют роль пространственной основы экосистем. Несмотря на многочисленные исследования, проведенные в различных секторах Антарктики, почвы этого региона остаются недостаточно изученными. Целью данного исследования является изучение процессов биогенной аккумуляции вещества и биогенно-абиогенных взаимодействий в почвах Берега Правды и архипелага Хасуэлл, Восточная Антарктида — окрестности круглогодичной станции Мирный. В ходе исследования были проведены полевые наблюдения и лабораторные анализы почв, с акцентом на определение химического состава и уровней накопления органического вещества. Установлено, что почвы имеют умеренно кислую и близкую к нейтральной реакцию. На острове Хасуэлл зафиксированы высокие уровни накопления общего углерода, обусловленные орнитогенным влиянием. В отличие от других почв Восточной Антарктиды, здесь наблюдается наличие гумусоподобной плазмы. Изученные почвы характеризуются низким (или умеренным) уровнем загрязнения согласно геоаккумуляционному индексу *Igeo*, однако отмечается увеличение темпов аккумуляции поллютантов в орнитогенных местообитаниях и на поверхности торфяных горизонтов.

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Ключевые слова: криогенные почвы, орнитогенные почвы, микроморфология, тяжелые металлы, Восточная Антарктида

Для цитирования: Алексеев И.И., Грек Е.Н., Четверова А.А. Орнитогенные почвы Берега Правды и архипелага Хасуэлл, Восточная Антарктида: морфологическое строение и биогеохимические особенности. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):184–200. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-184-200>

Поступила 01.12.2024

После переработки 28.04.2025

Принята 27.05.2025

Ornithogenic soils of Pravda Coast and Haswell archipelago, East Antarctica: morphological composition and biogeochemical features

Ivan I. Alekseev^{1,2✉}, Elena N. Grek^{1,3}, Antonina A. Chetverova¹

¹ State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Karelian Research Centre of the Russian Academy of Science, Petrozavodsk, Russia

³ State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

✉ i.alekseev@aari.ru

 ИА, 0000-0002-0512-3849; ENG, 0000-0002-5515-4686; AAC, 0000-0001-7461-3617

Abstract. In view of the continuing human expansion in Antarctica, it is crucial to implement a wide range of measures to effectively protect the natural environment and uphold the fundamental principles of the Antarctic Treaty system. Soil is the most important component of all terrestrial ecosystems, which plays a crucial role as the spatial basis of ecosystems. Despite the considerable research performed in different sectors of Antarctica, soils and soil-like bodies of Antarctica remain poorly investigated. The aim of this study is to investigate the processes of biogenic accumulation of substances and biogenic-abiogenic interactions in the soils of the Pravda Coast and the Haswell Archipelago, East Antarctica — vicinities of the Antarctic station Mirny. Field observations and laboratory analyses were conducted, focusing on determining the chemical composition and levels of organic matter in the soils. It was found that the soils exhibit a moderately acidic to near-neutral pH. High levels of organic carbon accumulation were recorded on Haswell Island, influenced by ornithogenic factors. Unlike most soils in East Antarctica, these soils display a presence of humus-like plasma. The soils studied are characterized by low (or moderate) levels of contamination, according to *Igeo* (geoaccumulation index); however, an increase in pollutant accumulation rates is observed in ornithogenic habitats and on the surfaces of peat horizons.

Keywords: cryogenic soils, ornithogenic soils, micromorphology, heavy metals, East Antarctica

For citation: Alekseev I.I., Grek E.N., Chetverova A.A. Ornithogenic soils of Pravda Coast and Haswell archipelago, East Antarctica: morphological composition and biogeochemical features. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):184–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-184-200>

Received 01.12.2024

Revised 28.04.2025

Accepted 27.05.2025

Введение

Эффективная реализация мер по охране окружающей среды крайне важна для сохранения уникальных экосистем Антарктики, а также для надлежащего соблюдения основополагающих принципов Договора об Антарктике. Эти меры включают оценку антропогенного воздействия на окружающую среду (ввиду интенсификации

туристической деятельности, расширения присутствия национальных антарктических программ и пр.) и постоянный мониторинг различных компонентов природных экосистем, таких как почвы.

Несмотря на увеличение количества научных исследований природной среды Антарктиды, почвы этого региона все еще остаются недостаточно изученными. Хотя в большинстве исследований делается вывод о преобладании слабо развитых почв по всей Антарктиде [1–3], некоторые из последних работ показывают значительное разнообразие почв [4–7]. Стоит отметить, что для большинства почв Антарктиды (особенно прибрежных оазисов Восточной Антарктиды) характерны следующие особенности: отсутствие (или слабо развитость) верхних органо-генных и органо-минеральных горизонтов, слабо выраженная дифференциация почвенных горизонтов и их латеральная сплошность, отсутствие структуры почвенного материала и образования глинистых минералов [5]. Почвы Антарктиды в целом отличаются слабо развитыми высокоскелетными профилями с низкими содержаниями органического вещества [4–7]. Так как основным лимитирующим фактором почвообразования на шестом континенте является увлажнение, а не температура, то наиболее влагообеспеченные местообитания, которые заняты комплексами низших растений, являются главными ареалами «классического» почвообразования [6–8]. При слабоинтенсивном разложении и гумификации растительных остатков, связанных с коротким периодом биологической активности, процессы почвообразования проходят замедленно. Экосистемы антарктических оазисов и прибрежных территорий испытывают воздействие привнесенного органического вещества — гуано, которое коренным образом влияет на ход почвообразования и выветривания скальных пород. Так, по опубликованным ранее данным, колонии пингвинов на острове Хасуэлл (1 км²) привносят на сушу около 10 тонн обогащенного азотом и фосфором органического вещества в год [1].

Орнитогенные почвы являются специфическим вариантом почвообразования, который особенно широко представлен в Западной Антарктиде [9]. Отдельные исследования приводятся и для Арктического региона [10, 11].

Разными авторами ранее была установлена специфика организации и функционирования орнитогенных почв Антарктики [9, 12, 13]. Было отмечено, что высокий уровень накопления биофильных элементов вместе в орнитогенным переносом семян и целых растений является причиной формирования тундровых сообществ в Маритимной зоне Антарктики, что коренным образом отличает эту зону от остальных частей региона [9]. М.А. Глазовская [1] описывала глубокую трансформацию минеральной массы почвообразующих пород под материалом гуано. К.К. Марков в своей работе [14] отмечал, что к эвтрофикации водоемов острова Хасуэлл и интенсивному росту низших растений в них приводят именно огромные залежи гуано. Это подтверждается данными, опубликованными в работе Е.Е. Сыроечковского [15]. Достаточно полный обзор параметров орнитогенного почвообразования дан в исследовании бразильских коллег [16]. Так, в частности, как отдельный почвообразовательный процесс был выделен процесс орнитогенного почвообразования (авторы выделяют накопление фосфора и азота, а также интенсивное депонирование органического вещества как основные признаки этого типа почвообразования). Помимо этого, было отмечено, что в случае орнитогенного почвообразования формируются новые почвенные минералы класса фосфатов. В целом орнитогенные почвы (Ornithosols) [17] характеризуются низкими значениями рН, высокими значениями органического

углерода и азота [18, 19]. Орнитогенный процесс почвообразования проявляется в субсидировании бедных наземных экосистем песчаных и каменистых островов органическим веществом. На поверхность почв поступают углерод и азот, что способствует формированию орнитогенных почв и посторнитогенных сукцессий растительности. Орнитогенное почвообразование проявляется не только в участках накопления гуано, но и при колонизации субстратов растениями и мелкими беспозвоночными организмами, перенесенными в результате орнитохории. Кроме непосредственного влияния птиц на локалитеты почв орнитогенных пляжей, их влияние распространяется путем частичного растворения и миграции веществ в ландшафте, нитрификации, что приводит к запуску посторнитогенных сукцессий и коренному изменению локальной геохимии ландшафтов [16].

Настоящее исследование посвящено исследованию морфологических особенностей, физико-химических и биологических характеристик почв, а также определению характерных особенностей процессов биогенной аккумуляции органического вещества и оценке возможных источников загрязнения в почвах Берега Правды и архипелага Хасуэлл, Восточная Антарктида.

Материалы и методы

Полевые экспедиционные работы выполнялись в рамках сезонной 69-й Российской антарктической экспедиции в районе станции Мирный в январе–марте 2024 г.

Берег Правды и архипелаг Хасуэлл

Данный район исследования ($66^{\circ} 31' \text{ ю. ш.}$, $93^{\circ} 00' \text{ в. д.}$) прилегает непосредственно к территории российской круглогодичной станции Мирный. Станция расположена на Берегу Правды (Земля Королевы Мэри) (рис. 1). Окрестности станции стихийно завалены разным брошенным неисправным и разобранным оборудованием, расходными материалами, запчастями, загрязнены разливами масла и бензина. Архипелаг Хасуэлл расположен всего в 3 км от станции Мирный на континентальном

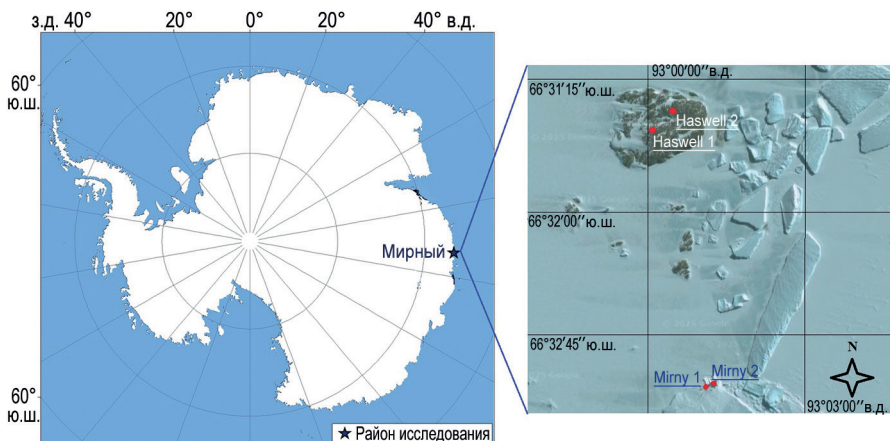


Рис. 1. Карта района исследования — Берег Правды и остров Хасуэлл, точками обозначены места заложения почвенных разрезов (прикопок) (основа изображения ©Google Earth 2010)

Fig. 1. Map of the study area — Pravda Coast and Haswell archipelago, points — location of soil pits (background image credit @Google Earth 2010)

берегу моря Дэвиса [16]. Остров Хасуэлл — самый крупный из островов архипелага, расположенный у побережья Антарктиды, примерно в 3 км (1,9 мили) к северу от мыса Мабус на Земле Королевы Мэри. Остров Хасуэлл признан Особо охраняемым районом Антарктики № 127 [20], так как является местом гнездования почти всех видов птиц, гнездящихся в Восточной Антарктиде (антарктический буревестник *Talassoica antarctica*, серебристо-серый буревестник *Fulmarus glacioides*, капский буревестник *Daption capense*, снежный буревестник *Pagodroma nivea*, качурка Вильсона *Oceanites oceanicus*, южнополярный поморник *Catharacta maccormicki*, пингвин Адели *Pygoscelis adeliae*). В районе встречаются пять видов ластоногих, включая охраняемого тюленя Росса *Ommatophoca rossii*. Юго-восточнее острова на припайном льду располагается крупная колония императорских пингвинов *Aptenodytes forsteri* [21]. Площадь острова составляет 0,82 км², высота 93,1 м над уровнем моря. Абсолютные высоты большинства островов не превышают 35 м над уровнем моря [22].

Для района станции характерны частые метели, особенно зимой, а также сильные стоковые ветры. Средняя скорость ветра составляет 11,2 м/с, максимальная — 56 м/с. В течение года в среднем 204 дня скорость ветра в районе станции Мирный превышает 15 м/с. Преобладающее направление ветра восточно-юго-восточное. Среднегодовая температура воздуха составляет –11,5 °С, максимальная — 6,8 °С, минимальная –40,3 °С. Район богат айсбергами. Большую часть года море покрыто припаем. В море Дэвиса максимальная ширина припая в сентябре–октябре достигает 30–40 км [19].

Методики лабораторных исследований

Полученные в рамках полевых маршрутных исследований пробы почв на борту НЭС «Академик Трёшников» были доставлены в Санкт-Петербург для дальнейшего анализа. В ходе лабораторных анализов были определены химические и физические параметры почв по стандартным методикам [23]:

- рН водной суспензии и солевой рН (1:2,5);
- содержание органического углерода и азота на элементном анализаторе Vario EL III (Elementar, Germany);
- обменная кислотность и гидролитическая кислотность;
- гранулометрический состав почвы (доля мелкозема) пипет-методом Качинского [24];
- почвенное дыхание — инкубационный метод по Андерсону [25].

Шлифы для микроморфологических исследований были получены из микромонитов почв, отобранных в полевых условиях. Пробы были высушены и насыщены смолой. Шлифы были исследованы с помощью поляризационного микроскопа Leica DM 750 p (Leica, Швейцария) в проходящем свете и при скрещенных николях. Были исследованы следующие микроморфологические показатели почв: микроструктура почвы, пространственное распределение частиц, элементы микроструктуры и характер органического вещества. Терминология, используемая для микроморфологического описания проб, была взята из работ [26, 27], а также из руководства Э.И. Гагариной [28] и М.И. Герасимовой [29], где подробно описана микроорганизация почв.

Определение валового содержания тяжелых металлов в отобранных пробах проводили рентгенофлюоресцентным методом на спектрометре Спектроскан-МАКС фирмы «СПЕКТРОН» согласно методике (ОСТ 10-259–2000). Химические элементы были проанализированы как минимум в трехкратной повторности ($n = 3–6$).

Для оценки степени загрязнения почв были рассчитаны индексы геоаккумуляции (*Igeo*). Геоаккумуляционный индекс (*Igeo*) представляет собой количественный показатель, применяемый для оценки уровня загрязнения почвы или осадков тяжелыми металлами и другими токсичными веществами. Он позволяет определить степень накопления загрязняющих веществ в геосистемах по сравнению с фоновыми значениями, характерными для данной географической области [30]. Существуют следующие градации:

- $Igeo < 0$ — отсутствие загрязнения;
- $0 \leq Igeo < 1$ — легкое загрязнение;
- $1 \leq Igeo < 2$ — умеренное загрязнение;
- $2 \leq Igeo < 3$ — значительное загрязнение;
- $Igeo \geq 3$ — сильное загрязнение.

Этот индекс выражается следующим образом:

$$Igeo = \log_2 [Cn/1,5Bn], \quad (1)$$

где Cn — измеренная концентрация элемента (n) в почве; Bn — геохимическое фоновое значение элемента (n), константа 1,5 позволяет анализировать естественные колебания содержания данного вещества в окружающей среде и выявлять очень небольшое антропогенное влияние.

Ранее было сделано заключение, что значения содержаний элементов в земной коре и средние значения содержаний элементов в почве не всегда могут использоваться как фоновые в расчетах индексов, подобных *Igeo*, поскольку невозможно получить рациональные результаты [31]. Поэтому некоторые авторы предлагают, где это возможно, использовать местные фоновые значения (образцы из незагрязненных почв) [32]. Однако, учитывая очень ограниченные данные о микроэлементах в природных почвах архипелага Хасуэлл, значения верхней континентальной коры были использованы в качестве фоновых концентраций для исследовательских участков станции Мирный и острова Хасуэлл.

Результаты и обсуждение

Морфологические особенности почв

Стоит подчеркнуть, что по особенностям распространения почвенного покрова Антарктида — это группа мелких и сильно удаленных друг от друга «островов педосферы», каждый из которых обладает своей спецификой [6, 7]. Архипелаг Хасуэлл и Берег Правды хоть и являются самыми северными в географическом плане районами исследования, но в то же время отличаются наибольшей суровостью климатических условий.

В верхних горизонтах посторнитгенных почв преобладают процессы торфообразования и торфонакопления. Материал этих горизонтов представлен преимущественно неразложившимися и слабо разложившимися остатками моховой растительности. Гумусовые горизонты характеризуются различной степенью ассоциации остатков гуано с минеральной частью, что связано как с разным количеством самого мелкозема, так и со степенью разложения гуано. Также заметны процессы гумификации, наблюдается тенденция к агрегированию почвенной массы. Все это свидетельствует о большой роли органического вещества гуано в почвообразовательном процессе. В срединных горизонтах отмечены признаки ожелезнения минералов

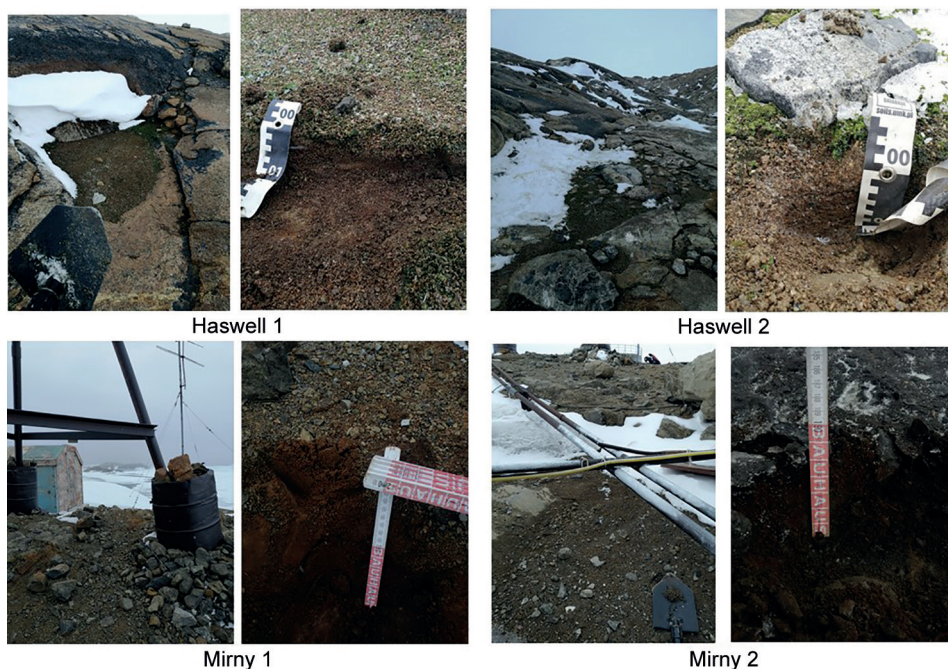


Рис. 2. Изученные почвенные профили и ландшафты: Haswell 1 — литозем криотурбированный на многолетнемерзлых породах (Turbic Lithic Cryosol (Arenic)); Haswell 2 — литозем орнитогенный криотурбированный на многолетнемерзлых породах (Ornithic Turbic Cryosol (Arenic)); Mirny 1 — технозем криотурбированный на многолетнемерзлых породах (Turbic Technosol (Arenic)); Mirny 2 — технозем криотурбированный на многолетнемерзлых породах (Turbic Technosol (Arenic) coarsic). Названия в скобках согласно World Reference base for soil resources [17]

Fig. 2. Soil profiles and landscapes studied: Haswell 1 — Turbic Lithic Cryosol ; Haswell 2 — Ornithic Turbic Cryosol (Arenic); Mirny 1 — Turbic Technosol (Arenic)); Mirny 2 — Turbic Technosol (Arenic) coarsic. Names according to the World Reference base for soil resources [17]

(железистые пленки на поверхности), а также ассоциирование минералов обломочной фракции с органическим веществом гуано (в меньшей степени, чем в вышележащих собственно орнитогенных горизонтах) (рис. 2).

Помимо этого, продукты жизнедеятельности птиц (гуано) способствуют частичному растворению и миграции веществ в ландшафте, нитрификации, что приводит к запуску посторнитогенных сукцессий [33].

Микроморфологическое строение почв

В рамках настоящего исследования было изучено микроморфологическое строение поверхностных и срединных горизонтов как орнитогенных почв (на примере профиля Haswell 2), так и почв, не подверженных прямому активному влиянию орнитогенного фактора (на примере профиля Mirny 2).

Плазма в изученных шлифах поверхностного горизонта орнитогенной почвы (Haswell 2) имеет хорошо выраженную ламинарную структуру в материале гуано (рис. 3). Гуано очень плотно покрывает поверхность зерен и образует толстые пленки и широкие микрозоны с уплотненной скелетной структурой. В некоторых микрозонах

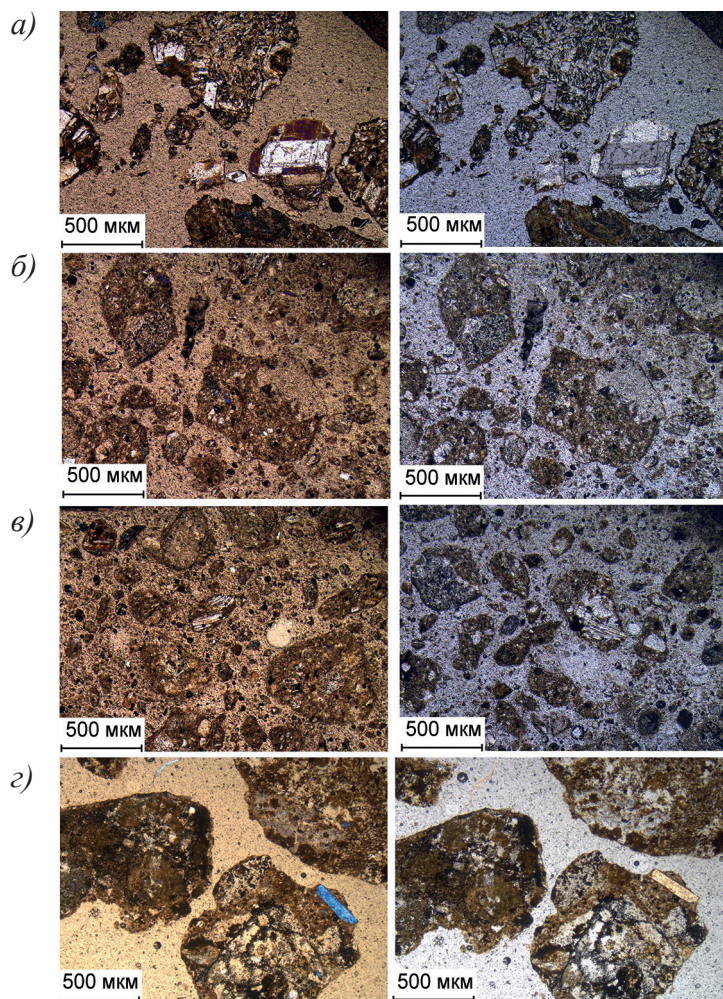


Рис. 3. Микроморфологическое строение почв Берега Правды и острова Хасуэлл, Восточная Антарктида. Слева — скрещенные николи, справа — параллельные николи. Пробы: *а* — Haswell 2 0–1 см; *б* — Haswell 2 1–23 см; *в* — Mirny 2 0–2 см; *г* — Mirny 2 2–20 см

Fig. 3. Micromorphological features of soils of Pravda Coast and Haswell island, East Antarctica. Left — nicols X, polarized light; right — nicols II, plain light. Samples: *a* — Haswell 2 0–1 cm; *б* — Haswell 2 1–23 cm; *в* — Mirny 2 0–2 cm; *г* — Mirny 2 2–20 cm

образуются сгустки и конкреции, а в периферических частях плазмы образуются микроскопические кристаллы биогенных фосфатов и сульфатов.

Другим специфическим типом органогенной плазмы, которая образуется в орнитогенных и посторнитогенных почвах под современными или заброшенными местами гнездования, является гумусоподобная плазма, которая представляет собой еще один широко распространенный пример органоминеральных взаимодействий в орнитогенных и посторнитогенных почвах [33]. Она может накапливаться на поверхности крупных зерен в виде гуано и плохо разложившегося орнитогенного материала

(фрагменты перьев, яичной скорлупы, тканей и костей), а также в виде органической коллоидной плазмы (рис. 3). Образование биопленок здесь также происходит за счет живых и мертвых остатков колоний нитрофильных водорослей (в основном *Prasiola crista*) как на поверхности почвы, так и на каменных валунах и гравии. В условиях обогащенного азотом субстрата заселение поверхности водорослями происходит довольно интенсивно, что характерно для начальных этапов экогенетической сукцессии, что обусловлено высоким содержанием легкодоступных элементов питания.

Почвы, развивающиеся по петроземно-литоземному типу [34] без заметного влияния орнитогенного фактора (Mirny 2), значительно отличаются по микростроению. Здесь так же, как и в почвах оазисов Восточной Антарктиды, наблюдается серитизация полевых шпатов, а глинообразование развито значительно в меньшей степени, чем в почвах под слоем гуано [4]. Наблюдается формирование агрегатов пластинчатой и линзовидной формы из-за многократного замерзания и оттаивания почв. На микроморфологических снимках можно увидеть особенности неогенеза и перераспределения карбонатов кальция, а также микрокристаллическую известковую агрегацию и цементацию скелетных частиц.

Для срединных горизонтов (Mirny 2 2–20 см и Haswell 2 1–23 см) в целом отмечены следующие схожие микроморфологические особенности: на поверхностях зерен обычно образуются тонкие прерывистые пленки коричневого цвета, а желтоватые интерференционные цвета, наблюдаемые в скрещенных слоях, объясняют преимущественно глинистый состав мелкозернистых материалов с железистыми компонентами. В обоих исследованных шлифах подповерхностных горизонтов мелкоземистый материал встречается редко и обычно присутствует в виде пленок (коричневого цвета) на поверхностях песка и гравия. На микрофотографиях заметны некоторые зоны с глинистой плазмой и оптически-ориентированная аккумуляция глинистого материала. Это в принципе характерно для почв оазисов Восточной Антарктиды, наряду с глинистыми пленками (кутанами) на минеральных зернах, что было описано ранее нашими коллегами [6, 7]. Отмеченные на микрофотографиях пустоты указывают на активное влияние на структуру почвы циклов промерзания-оттаивания, а также возможность иллювиирования глинистого материала по профилю по этим пустотам.

Физико-химические характеристики почв

Основные почвенные физико-химические параметры изученных на территории, прилегающей к круглогодичной станции Мирный — Берег Правды и архипелаг Хасуэлл, — почв приведены в табл. 1. Для изученных почв характерна умеренно

Таблица 1

Физико-химические параметры изученных почв Берега Правды и острова Хасуэлл
 Table 1

Physical-chemical parameters of the soils of Pravda Coast and Haswell island

Почвенный горизонт, глубина	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	ТС, %	N, %	C:N	Базальное дыхание, мг·г ⁻¹ ·сутки ⁻¹	Мелкозем (<1 мм), %
Mirny 1 0–1,5 см BC ₁	5,90±0,43	5,72±0,32	1,52±0,09	0,18±0,03	8,44±0,76	0,008±0,001	27,13±1,56
Mirny 1 1,5–20 см BC ₂	5,96±0,23	5,82±0,12	0,52±0,08	0,051±0,03	10,02±0,21	0,009±0,002	22,13±1,02

Окончание табл. 1

Почвенный горизонт, глубина	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	ТС, %	N, %	C:N	Базальное дыхание, мг·г ⁻¹ ·сутки ⁻¹	Мелкозем (<1 мм), %
Mirny 2 0–2 см BC ₁	5,76±0,32	5,32±0,45	1,24±0,12	0,11±0,02	11,27±1,21	0,008±0,001	23,58±1,87
Mirny 2 2–20 см BC ₂	5,86±0,12	5,62±0,23	0,45±0,08	0,050±0,007	9,21±0,76	0,007±0,001	18,58±1,56
Haswell 1 0–3 см Bc _{algae}	5,89±0,12	5,42±0,12	2,24±0,10	0,21±0,02	10,27±0,21	0,027±0,003	27,58±0,57
Haswell 1 3–15 см BC	5,76±0,11	5,42±0,10	0,98±0,12	0,098±0,02	10,05±0,18	0,008±0,001	24,58±0,57
Haswell 2 0–1 см (AY _{om})	6,17±0,12	6,02±0,12	12,62±0,87	4,02±0,12	3,14±0,13	0,132±0,10	32,02±1,02
Haswell 2 1–23 см (BC _{om})	5,76±0,14	5,20±0,12	4,96±0,56	0,98±0,30	5,04±0,18	0,087±0,009	28,02±0,87

кислая и близкая к нейтральной реакция среды. Самые высокие уровни накопления органического вещества (углерода до 12,62 %, азота до 4,02 %) и почвенного дыхания (до 0,132 мг·г⁻¹·сутки⁻¹) отмечаются на острове Хасуэлл, находящемся под сильным влиянием орнитогенного фактора (места гнездования *Pygoscelis adeliae* и летающих птиц). Доля мелкозема в изученных почвах колеблется от 18,58–27,13 % в почвах окрестностей станции Мирный до 24,58–32,02 % в случае орнитогенных почв острова Хасуэлл.

Связь почвенных параметров и степени химического загрязнения почв

Данные по содержанию тяжелых металлов в изученных почвах приведены в табл. 2. Средние концентрации металлов среди исследованных существенно различались (дисперсионный анализ Краскела–Уоллиса, $p < 0,001$). Анализ показал, что содержание исследуемых элементов составило 0,04–55,70 мг·кг⁻¹ (Pb), 0,05–12,8 мг·кг⁻¹ (Cr), 1,75–125,2 мг·кг⁻¹ (Cu), 0,052–1,060 мг·кг⁻¹ (Cd), 0,46–26,2 мг·кг⁻¹ (Ni), 16,05–206,60 мг·кг⁻¹ (Zn), 0,100⁻¹, 189 мг·кг⁻¹ (As), 0,021–0,533 мг·кг⁻¹ (Hg) в окрестностях станции Мирный и прилегающего острова Хасуэлл.

В целом верхние горизонты почвы антропогенных участков на станции Мирный показали более высокие концентрации большинства изученных элементов по сравнению с природными ландшафтами острова Хасуэлл. Однако поверхностная проба орнитогенной почвы, образовавшейся под непосредственным воздействием гуано пингвинов, показала повышенное содержание цинка (до 256,50 мг/кг) и мышьяка (до 1,213 мг/кг). В верхнем слое почвы, находящейся в отдалении от места гнездования пингвинов (Haswell 1 0–3 см), такие тенденции накопления не наблюдаются. Предыдущие исследования влияния морских птиц на развитие почв в районе субантарктических островов и арктических островов [10, 11, 36] показали, что эти процессы вносят существенный вклад в перенос микроэлементов и питательных веществ из морских в прибрежные экосистемы.

Индекс геоаккумуляции (*Igeo*) характеризует почву Mirny 2 как умеренно загрязненную ($1 < Igeo < 2$) по свинцу (Pb) и от незагрязненной до умеренно загрязненной ($0 < Igeo < 1$) по никелю. Все пробы со станции Мирный и острова Хасуэлл характеризуются как практически не загрязненные ($Igeo \leq 0$) в отношении

Таблица 2

**Содержание тяжелых металлов в изученных почвах
 Берега Правды и острова Хасуэлл**

Table 2

Heavy metals content in the soils of Pravda Coast and Haswell island

Почвенный горизонт, глубина	Pb, мг·кг ⁻¹	Cr, мг·кг ⁻¹	Cu, мг·кг ⁻¹	Cd, мг·кг ⁻¹	Ni, мг·кг ⁻¹	Zn, мг·кг ⁻¹	As, мг·кг ⁻¹	Hg, мг·кг ⁻¹
Mirny 1 0–1,5 см BC ₁	1,05±0,14	0,06±0,01	6,24±0,80	0,108±0,056	0,75±0,010	45,3±2,09	1,128±0,14	0,021±0,002
Mirny 1 1,5–20 см BC ₂	55,7±2,31	10,2±1,02	125,2±5,1	0,107±0,024	26,2±1,96	103,6±4,2	0,718±0,067	0,020±0,004
Mirny 2 0–2 см BC ₁	6,20±0,56	12,8±1,04	50,2±2,10	0,199±0,027	13,2±1,02	116,2±5,3	0,100±0,017	0,533±0,067
Mirny 2 2–20 см BC ₂	18,62±1,3	8,82±0,87	12,35±0,87	0,077±0,010	8,69±0,56	47,2±1,212	0,580±0,087	0,021±0,003
Haswell 1 0–3 см Bc _{algae}	0,53±0,08	0,76±0,12	1,75±0,45	0,052±0,09	0,46±0,08	16,05±1,10	1,189±0,12	0,025±0,004
Haswell 1 3–15 см BC	0,18±0,03	1,20±0,34	6,64±0,87	0,368±0,045	0,73±0,09	64,30±2,2	0,456±0,087	0,018±0,005
Haswell 2 0–1 см (AY _{orn})	0,04±0,01	2,27±0,61	19,40±1,97	1,06±0,09	0,90±0,12	206,6±6,43	0,100±0,018	Не обнаружено

Таблица 3

**Геоаккумуляционный индекс (*Igeo*) в изученных пробах почв
 Берега Правды и архипелага Хасуэлл**

Table 3

Geoaccumulation index (*Igeo*) in soil samples from Pravda Coast and Haswell archipelago

Почвенный горизонт, глубина	Pb	Cr	Cu	Cd	Ni	Zn	As	Hg
Mirny 1 0–1,5 см BC ₁	–4,18	–10,12	–1,87	–0,76	–4,12	–0,53	–2,31	–1,41
Mirny 1 1,5–20 см BC ₂	1,42	–2,12	3,45	–2,15	0,43	0,87	–3,71	–1,87
Mirny 2 0–2 см BC ₁	–2,31	–2,01	1,98	–1,87	–0,76	0,67	–6,34	3,5
Mirny 2 2–20 см BC ₂	–0,87	–3,12	–0,41	–3,14	–0,87	–0,42	–4,1	–1,98
Haswell 1 0–3 см Bc _{algae}	–4,96	–6,41	–3,12	–2,87	–5,76	–1,87	–2,31	–1,73
Haswell 1 3–15 см BC	–8,12	–4,51	0,12	2,04	–4,12	2,15	–5,98	–1,55
Haswell 2 0–1 см (AY _{orn})	–8,01	–5,31	–1,76	–0,31	–4,12	–0,08	–3,78	–

хрома (Cr). Значения *Igeo*, равные 1,98, были найдены для меди (Cu) в верхнем горизонте Mirny 2 0–2 см, что указывает на умеренное загрязнение почв по данному индексу. Срединный горизонт орнитогенной почвы (Haswell 1 3–15 см) характеризуется значением *Igeo* по кадмию, равным 2,04, *Igeo* по цинку, равным 2,15 (умеренно загрязненная проба), и значением *Igeo* по меди, равным 0,12, что характеризует эту пробу как практически не загрязненную по данному элементу. Эти рассчитанные показатели, характеризующие некоторую степень загрязнения данной пробы, вероятно, связаны с более высоким накоплением этих элементов в продуктах жизнедеятельности пингвинов. Феномен накопления Cd в орнитогенных почвах и более высокий индекс *Igeo* ранее были описаны для Маритимной Антарктики [37]. Все изученные верхние горизонты почв окрестности станции Мирный и острова Хасуэлл были охарактеризованы как практически не загрязненные (*Igeo* ≤ 0) в отношении ртути (Hg), кроме верхнего горизонта почвы Mirny 2 0–2 см, где значение *Igeo* составило 3,50. В целом полученные значения *Igeo* для изученных тяжелых металлов и металлоидов ниже или немного выше нуля, что указывает на низкое или умеренное загрязнение изученных почв.

Для оценки рисков загрязнения окружающей среды особенно важно определить возможные источники загрязняющих веществ, а именно разграничить антропогенные и природные аномалии. Однако широко известно, что загрязнение природной среды обычно представляет собой сочетание и взаимодействие различных факторов.

В результате статистического анализа, позволяющего выявить корреляцию между содержанием изученных тяжелых металлов и физико-химическими параметрами в исследуемых почвах, никаких значимых положительных корреляций между почвенными параметрами и содержанием тяжелых металлов обнаружено не было. Это может быть связано с высокой изменчивостью значений как содержания металлов, так и физико-химических параметров в исследуемых почвах. В почвах станции Мирный и острова Хасуэлл значимая положительная корреляция обнаружена для пар медь–хром ($R = 0,915$), хром–никель ($R = 0,914$), медь–никель ($R = 0,808$), медь–цинк ($R = 0,831$). Также наблюдалась значимая отрицательная корреляция между цинком и мышьяком ($R = -0,827$).

В связи с высокой изменчивостью распределения металлов в почвенном профиле, а также с сочетанием возможных источников накопления тяжелых металлов в почве был проведен анализ главных компонент (PCA) с целью выявления зависимостей между содержанием в почве различных тяжелых металлов (см. табл. 4).

Главный компонент 1 (PC1) объясняет 62,4 % общей вариации и показывает значительные положительные факторные нагрузки по содержанию общего органического углерода, азота, мелкозема, цинка и кадмия. Обычно содержание общего органического углерода (TOC) и гранулометрический состав почвы считаются наиболее важными свойствами, которые необходимо учитывать при исследовании поведения тяжелых металлов в почвах [28, 29]. Содержание тяжелых металлов обычно увеличивается по мере увеличения содержания мелкозема из-за более высокой способности мелких частиц адсорбировать тяжелые металлы. Органические вещества также были описаны как хорошие поглотители металлов [32]. В этом контексте изучение орнитогенных почв становится особенно актуальным для целей мониторинга окружающей среды и оценок экологических рисков, связанных с деятельностью человека в Антарктиде. Ранее обсуждалось, что орнитогенные почвы, как правило,

Таблица 4

Матрица нагрузок (factor solution) анализа главных компонент для почв Берега Правды и острова Хасуэлл

Table 4

Factor solution matrix of the principal component analysis (PCA) of soils of Pravda Coast and Haswell island

Переменная	Главные компоненты		
	PC1 (62,40 % общей вариации)	PC2 (19,80 % общей вариации)	PC3 (5,25 % общей вариации)
Pb	−0,012	0,852	−0,039
Cd	0,756	0,081	0,001
Cr	−0,386	0,743	−0,102
Cu	0,07	0,912	0,132
Ni	−0,327	0,901	−0,023
Zn	0,734	0,435	0,191
As	−0,243	0,121	−0,634
Hg	−0,141	0,231	0,792
pH	−0,052	−0,062	0,932
TOC	0,784	−0,324	−0,071
N	0,79	−0,235	−0,005
C/N	−0,746	0,283	−0,102
Мелкозем	0,601	−0,472	−0,305

Примечание. Примененный метод ротации — варимакс (varimax).
Note. The applied rotation method is varimax.

характеризуются повышенными содержаниями не только органических веществ, но и тяжелых металлов [38–41], что хорошо коррелирует с нашими данными. Относительно высокое содержание мышьяка может быть вызвано его растворением в воде [42], откуда он может быть поглощен морскими водорослями и антарктическим крилем и, следовательно, попасть в пищевую сеть, переходя к хищникам, таким как пингвины, что объясняет его относительно высокие концентрации в материале гуано [43]. В связи с этим процессы переноса биоаккумулированных металлов в наземные экосистемы в виде материала гуано птиц следует изучить более подробно, чтобы выбрать адекватные параметры для описания уровня загрязнения почвы. С другой стороны, повышенное содержание цинка на некоторых участках исследования, вероятно, связано с возведением стальных инфраструктурных конструкций станций, а также может указывать на загрязнение почв за счет попадания на его поверхность топлива или осаждения выхлопных газов.

Компонент 2 (PC2) объясняет 19,8 % общей вариации и показывает наиболее значительные положительные факторные нагрузки по содержанию меди, хрома, никеля и свинца, что указывает на предположительно единый источник накопления данных металлов и подтверждает гипотезу об антропогенном происхождении. Часто накопление этих металлов в почвах антропогенно-нарушенных территорий в Антарктиде связывают с разливами топлива, попаданием лакокрасочных изделий (в случае Pb и Cd) и металлическими конструкциями из нержавеющей стали [44].

Самые высокие содержания Pb и Cu были найдены в поверхностных горизонтах почв станции Мирный и, вероятно, связаны с интенсивным загрязнением ландшафтов, связанным с разливом топлива, а также открытым складированием отходов. Принято считать, что на накопление хрома и никеля особенно сильное влияние оказывают геохимические факторы среды [38], поэтому необходимы дальнейшие исследования геохимического режима почв оазисов Восточной Антарктиды. Однако мы не можем исключать антропогенный характер источников поступления никеля в почвы (выхлопные газы и другие источники атмосферного загрязнения). Компонент 3 (PC3) объясняет 5,25 % общей вариации и показывает значительные положительные факторные нагрузки по содержанию ртути и значениям pH. Ранее было показано, что изменения pH оказывают сильное влияние как на концентрацию тяжелых металлов, так и на их выщелачиваемость [38, 44].

Заключение

Нами были изучены биогенно-абиогенные взаимодействия и биогенно-аккумулятивные процессы в почвах Берега Правды и острова Хасуэлл. Морфологически изученные почвы обладают высокоскелетными и маломощными профилями с незначительным накоплением органического вещества. Однако в условиях активного влияния орнитогенного фактора происходит обогащение верхних горизонтов почвы органическим веществом.

В почвах, не подверженных прямому орнитогенному влиянию, в микростроении преобладает грубообломочный скелет, в нем отмечается высокая порозность, глинистые же частицы распределены в мелкозем в основном диффузно. Отдельные минеральные зерна покрыты тонкими глинистыми кутанами и пленками, что также показывает подвижность глинистого материала. В микростроении орнитогенных и посторнитогенных почв широко представлена гумусоподобная плазма, которая может накапливаться на поверхности крупных зерен в виде гуано и плохо разложившегося орнитогенного материала, а также в виде органической коллоидной плазмы.

Анализ взаимосвязей между почвенными параметрами и уровнями аккумуляции тяжелых металлов показал, что некоторое увеличение аккумуляции поллютантов наблюдается в орнитогенных местообитаниях, а также на поверхности верхних оторфованных горизонтов (в основном по кадмию, цинку и мышьяку), что, предположительно, вызвано накоплением этих элементов в наземных экосистемах вследствие биотранспорта из морских экосистем по пищевым цепям.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00361, <https://rscf.ru/project/24-27-00361/>.

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам 69-й Российской антарктической экспедиции за помощь в проведении полевых исследований.

Competing interests. Authors declare no conflict of interests.

Funding. This study was supported by Russian Science Foundation, grant № 24-27-00361, <https://rscf.ru/project/24-27-00361/>.

Acknowledgments. Authors wish to express their gratitude to the expedition members (69th Russian Antarctic expedition) for their crucial help in performing fieldwork.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Глазовская М.А. Биогеохимическое выветривание вулканических пород андезитового состава в субантарктических перигляциальных условиях. *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2002;3:39–48. Glazovskaya M.A. Biogeochemical weathering of volcanic rocks of andesitic composition in Sub-Antarctic conditions. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya.* 2002;3:39–48. (In Russ.).
2. Глазовская М.А. Выветривание и первичное почвообразование в Антарктиде. *Научные доклады высшей школы. Геол.-геогр. науки.* 1958;1:63–76.
3. Bockheim J., Hall K. Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. *South African Journal of Science.* 2002;98:82–90.
4. Alekseev I., Abakumov E. Soil organic matter and biogenic-abiogenic interactions in soils of Larsemann Hills and Bunger Hills, East Antarctica. *Polar Science.* 2024;40:101040. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2023.101040>
5. Lupachev A., Abakumov E., Goryachkin S., Veremeeva A. Soil cover of the Fildes Peninsula (King George Island, West Antarctica). *Geoderma.* 2020;193:104613. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104613>
6. Dolgikh A.V., Mergelov N.S., Abramov A.A., Lupachev A.V., Goryachkin S.V. Soils of Enderby Land. In: Bockheim J.G. (ed.) *The soils of Antarctica.* Cham, Switzerland: Springer; 2015. P. 45–63.
7. Mergelov N., Konyushkov D., Lupachev A., Goryachkin S. Soils of Mac Robertson land. In: Bockheim J.G. (ed.) *The soils of Antarctica.* Cham, Switzerland: Springer; 2015. P. 65–86.
8. Орлов Д.С. *Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации.* М.: Изд-во МГУ; 1990. 325 с.
9. Abakumov E.V. Particle-size distribution in soils of West Antarctica. *Eurasian Soil Sc.* 2010;43:297–304. <https://doi.org/10.1134/S1064229310030075>
10. Blais J.M., Kimpe L.E., McMahon D., Keatley B.E., Mallory M.L., Douglas M.S., Smol J. Arctic seabirds transport marine-derived contaminants. *Science.* 2005;309:445. <https://doi.org/10.1126/science.1112658>
11. Brimble S.K., Foster K.L., Mallory M.L., MacDonald R.W., Smol J.P., Blais J.M. High arctic ponds receiving biotransported nutrients from a nearby seabird colony areal so subject to potentially toxic loadings of arsenic, cadmium, and zinc. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 2009;28:2426–2433. <https://doi.org/10.1897/09-235.1>
12. Pereira J.L., Pereira P., Padeiro A., Gonçalves 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;574:443–454. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.091>
13. Parnikoza I., Abakumov E., Korsun S., Klymenko I., Netsyk M., Kudinova A., Kozeretska I. Soils of the Argentine islands, Antarctica: Diversity and characteristics. *Polarforschung.* 2016;86:83–96.
14. Марков К.К. Некоторые данные о перигляциальных явлениях в Антарктиде (предварительное сообщение). *Вестн. Моск. ун-та. Сер. География.* 1956;1:139–148.
Markov K.K. Some data on periglacial phenomena in Antarctica (preliminary report). *Vestnik of Moscow State University. Geography.* 1956;1:139–148. (In Russ.).
15. Сыроечковский Е.Е. Роль животных в образовании первичных почв в условиях приполярной области Земного Шара (на примере Антарктики). *Зоологический журнал.* 1959;38(12):1770–1775.
16. Simas N., Schaefer C., Mendonca E., Silva I., Ribeiro A. Organic carbon stocks in permafrost-affected soils from Admiralty Bay, Antarctica. *Journal of research of the U. S. Geological Survey.* 2007;1047:76–79. <https://doi.org/10.3133/ofr20071047SRP076>

17. IUSS Working Group WRB. *World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (4th ed.)*. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS); 2022. 236 p.
18. Michel R., Schaefer C., Dias L., Simas F., Benites V., Mendonca E. Ornithogenic gelsols (cryosols) from Maritime Antarctica: pedogenesis, vegetation and carbon studies. *Soil Science Society of America Journal*. 2006;70:1370–1376. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0178>
19. Starck W. The avifauna of Haswell Island (East Antarctica) in summer of 1978/79. *Polish Polar Research*. 1980;1:183–196.
20. Secretariat of the Antarctic Treaty. *The Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty*. 1991. URL: <https://www.ats.aq/e/ep.html> (accessed 15.11.2024).
21. Голубев С.В. История изучения авифауны архипелага Хасуэлл (Восточная Антарктида). *Русский орнитологический журнал*. 2020;29:5967–5994.
Golubev S.V. The History of investigation of avifauna of Haswell archipelago (East Antarctica). *Russian Ornithological journal*. 2020;29:5967–5994. (In Russ.).
22. Golubev S. Diet and feeding behavior of the South Polar skuas *Stercorarius maccormicki* in the Haswell Islands, East Antarctica. *Birds*. 2024;5(2):240–254. <https://doi.org/10.3390/birds5020016>
23. Растворова О.А., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н. *Химический анализ почв*. СПб.: Изд-во СПбГУ; 1995. 264 с.
24. Качинский Н.А. *Физика почв*. М.: Высшая школа; 1970. 358 с.
25. Anderson J.P. Soil respiration. In: *Methods of soil analysis Part 2, 2nd Edition*. Madison: ASDA and SSA; 1982. P. 831–871.
26. Stoops G. Evaluation of Kubiena's contribution to micropedology. At the occasion of the seventieth anniversary of his book "Micropedology". *Eurasian Soil Science*. 2009;42(6):693–698. <https://doi.org/10.1134/S1064229309060155>
27. Stoops G. *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin section*. Madison, Wisconsin: Sci. Soc. America; 2003. 256 p.
28. Гагарина Э.И. *Микроморфологический метод исследования почв*. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2004. 155 с.
29. Gerasimova M.I., Kovda I.V., Lebedeva M.P., Tursina T.V. Micromorphological terms: the state of the art in soil microfabric research. *Eurasian Soil Science*. 2011;44(7):804–817. <https://doi.org/10.1134/S1064229311070052>
30. Muller G. Schwermetalle in den sediment des Rheins: Veranderungem seit 1971. *Umschau*. 1979;79:778–783.
31. Reimann C., de Caritat P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*. 2005;337(1–3):91–107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.06.011>
32. Blaser P., Zimmermann S., Luster J., Shotyk W. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in Swiss forest soils. *Science of the Total Environment*. 2000;249(1–3):257–280. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(99\)00522-7](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(99)00522-7)
33. Abakumov E.V., Parnikoza I.Y., Zhianski M., Yaneva R., Lupachev A.V., Andreev M.P., Vlasov D., Riano J., Jaramillo N. Ornithogenic factor of soil formation in Antarctica: a review. *Eurasian soil science*. 2021;54(4):528–540. <https://doi.org/10.1134/S1064229321040025>
34. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск: Ойкумена; 2024. 341 с.
35. Горячкин С.В. *Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция)*. М.: ГЕОС; 2010. 414 с.

36. Smith V.R. The influence of seabird manuring on the phosphorus status of Marion Island (Subantarctic) soils. *Oecologia (Berl)*. 1979;41:123–126.
37. Abakumov E., Lupachev A., Andreev M. Trace element content in soils of the King George and Elephant Islands, maritime Antarctica. *Chemistry and Ecology*. 2017;33(9):856–868. <https://doi.org/10.1080/02757540.2017.1384821>
38. Giordano R., Lombard G., Ciaralli L., Beccaloni E., Sepe A., Ciprotti M., Costantini S. Major and trace elements in sediments from Terra Nova Bay, Antarctica. *Science of the Total Environment*. 1999;227:29–40. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00402-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00402-1)
39. Cai M.H., Lin J., Hong Q.Q., Wang Y., Cai M.G. Content and distribution of trace metals in surface sediments from the northern Bering Sea, Chukchi Sea and adjacent Arctic areas. *Marine Pollution Bulletin*. 2011;63:523–527. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.02.007>
40. Wasserman J.C., Oliveira F.B.L., Bidarra M. Cu and Fe associated with humic acids in sediments of a tropical coastal lagoon. *Organic Geochemistry*. 1998;28:813–822. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(98\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(98)00044-8)
41. Metcheva R., Yurukova L., Teodorova S. Biogenic and toxic elements in feathers, eggs, and excreta of Gentoo penguin (*Pygoscelis papua ellsworthii*) in the Antarctic. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011;182:571–585. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1898-9>
42. Padeiro A., Amaro E., dos Santo M., Araujo M., Gomes S., Leppe M., Verkulich S., Hughes K., Peter H.U., Canario J. Trace element contamination and availability in the Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. *Environmental Science: Processes and Impacts*. 2016;8(6):648–57. <https://doi.org/10.1039/c6em00052e>
43. Krol A., Mizerna K., Bozym M. An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;384:121502. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121502>
44. Espejo W., Celis J., Sandoval M., Gonzalez-Acuna D., Barra D., Capulin J. The impact of penguins on the content of trace elements and nutrients in coastal soils of North Western Chile and the Antarctic Peninsula area. *Water, Air and Soil Pollution*. 2017;228:116. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3303-y>