

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 641.4

ПОЧВЫ ПОЛУОСТРОВА БРОКНЕС, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА¹

© 2022 г. Т. И. Кухарчик^{a, *}, С. В. Какарека^a, Ю. Г. Гигиняк^b

^aИнститут природопользования Национальной академии наук Беларуси,
ул. Ф. Скорины, 10, Минск, 220076 Беларусь

^bНаучно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
ул. Академическая, 27, Минск, 220072 Беларусь

*e-mail: tkukharchyk@gmail.com

Поступила в редакцию 06.04.2022 г.

После доработки 22.06.2022 г.

Принята к публикации 29.06.2022 г.

Приведены результаты исследования слабо развитых мерзлотных почв (Cryosols) в восточной части п-ова Брокнес, Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида. Полевые исследования выполнены на четырех ключевых участках, характеризующих влажные и сухие местоположения в пределах двух долин, повышенный сухой участок с визуальными признаками засоления и участок с моховой экосистемой, в январе–феврале 2020 г. по программе 12-й Белорусской антарктической экспедиции. Обсуждаются данные по гранулометрическому и химическому составу почв, кислотности, содержанию органического углерода, общего азота, подвижных элементов питания, обменных оснований и водорастворимых соединений. Показана вариабельность основных показателей почв ключевых участков. Соотношение $\text{Si}_2\text{O}_3/\text{R}_2\text{O}_3$ варьирует от 2.9 (для склонов долин) до 5.2 (для засоленного участка). Наибольшее содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ (2.62%), $\text{N}_{\text{общ}}$ (0.42%) и P_2O_5 (117.8 мг/кг) характерно для почв моховой экосистемы, а также переувлажненных местообитаний влажных долин: 1.84, 0.20% и 108.2 мг/кг соответственно. На засоленном участке выявлено повышенное содержание K_2O (217.3 мг/кг) и высокая доля обменного натрия (до 37–44%). Охарактеризован различный вклад почвообразующих факторов с доминированием литогенного (участок I), биогенного (участок II), геоморфологического (склоны долин на участке III), гидрологического и биогенного (днища долин на участках III и IV). Полученные данные о химических свойствах почв могут быть использованы как основа последующих оценок их функционирования в зависимости от климатических изменений и антропогенных нагрузок, а также дополнения базы данных о почвах Антарктиды.

Ключевые слова: Cryosols, почвообразующие факторы, элементы питания, обменные основания

DOI: 10.31857/S0032180X22100513

ВВЕДЕНИЕ

Изучение почв Антарктиды, активно продолжающееся с конца 1950-х годов [19, 21, 44], не утратило актуальности до настоящего времени. Особенности почвообразования в экстремальных условиях, влияние микроклимата, условий увлажнения, биоты, местоположения в рельефе и других факторов на интенсивность этих процессов привлекают все большее внимание как в пределах морской Антарктики [16, 27, 32, 33, 41, 45], так и в прибрежных оазисах континентальной части [6, 12, 14, 18, 34, 39].

Территория оазиса Холмы Ларсеманн представляет особый интерес в связи со сложной историей его развития и дегляциации, относительно большой свободной от ледникового покрова территорией (около 40 км²), а также высокой, по

меркам Антарктиды, освоенностью. Это второй по величине и самый южный прибрежный оазис в районе залива Прюдс Восточной Антарктиды. На п-ове Брокнес размещены четыре научные станции: Бхарати (Индия), Прогресс (Российская Федерация), Чжуншань (Китай) и Лоу-Раковита (Австралия–Румыния) [13].

Как и в других оазисах Антарктиды, почвы оазиса Холмы Ларсеманн изучались фрагментарно из-за малой доступности, короткого летнего сезона и экстремальных условий, затрудняющих проведение принятых в почвоведении и геохимии классических полевых исследований. Наиболее детальное описание почвенных разностей в пределах влажных долин оазиса, их морфологических особенностей с учетом положения в почвенной катене, условий увлажнения, температурных режимов, образования органического вещества представлено в работах Мергелова [11, 34]. На примере оазиса Холмы Ларсеманн изучались особенности формирования микропрофиля в результате функ-

¹ Дополнительные материалы к этой статье доступны по doi 10.31857/S0032180X22100513 для авторизованных пользователей.

ционирования эндолитных микроорганизмов внутри плотных пород [10]. Особенности миграции ряда элементов и химического выветривания на п-ове Сторнесс рассмотрены в работе Ван и Чжао [46], дегляциации и солевого выветривания — Кирнан с соавт. [30], биологической активности почв, формирования и развития микробных сообществ — Соиной с соавт. [14], Кудиновой с соавт. [6], Алексеевым с соавт. [18], загрязнения почв — Голдсуорси с соавт. [24], Ши с соавт. [40], Бхакта с соавт. [20].

Следует отметить, что в условиях глобальных климатических изменений информация о характеристиках и особенностях почв различных оазисов Антарктики приобретает чрезвычайно важное значение, позволяя оценить не только современные процессы, но и направленность развития с учетом интенсивности процессов выщелачивания и разнонаправленных процессов аккумуляции и выноса вещества.

Цель работы — охарактеризовать геохимические свойства почв, неоднородность почвенного покрова и роль почвообразующих факторов на п-ове Брокнес, восточной части оазиса Холмы Ларсеманн.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Общая характеристика района исследований. Исследования выполняли на п-ове Брокнес, который входит в состав оазиса Холмы Ларсеманн (69°30' S, 76°20' E). По данным [30], последнее оледенение здесь имело место более 100 тыс. л. н. Протерозойские породы представлены слоистым комплексом из кордиерита и гнейса, богатых Fe и Ti, а также гранатоносного парагнейса [23, 31]. Среди рыхлых отложений ледникового и элювиевального генезиса преобладают щебнистые пески.

П-ов Брокнес разделен глубоко вдающимся заливом Нелла Фьорд. Абсолютные отметки колеблются от 50 до 70 м над ур. м. в северной части, повышаясь к югу до 100 м; некоторые озера находятся на отметках 5–15 м. Оазис расчленен короткими (до 1 км) V-образными долинами, образовавшимися вдоль линеаментов в результате ледниковой эрозии [25, 36]. Межгорные долины являются важнейшим структурным элементом оазиса, поскольку служат ландшафтным фоном для формирования влажных долин, на долю которых приходится до четверти площади оазиса [9]. На вершинах холмов и на наветренных сторонах видны выветрелые поверхности с ямами. Морены встречаются редко. Максимальная мощность дельтового слоя составляет 95–100 см [11, 17]. К особенностям оазиса следует отнести возможное затопление части территории океанскими водами в межледниковые эпохи [26].

Оазис Холмы Ларсеманн является одним из самых теплых безледных пространств на побережье Восточной Антарктиды. Среднегодовая температура воздуха составляет -9.8°C , средняя температура января — $+0.6^{\circ}\text{C}$ (может подниматься до $+10^{\circ}\text{C}$ в дневное время); средняя температура августа — -15.9°C и редко опускается ниже -20°C ; средняя скорость ветра — 6.7 м/с [15]. Атмосферные осадки выпадают в твердом виде в количестве около 250 мм/год (рассчитаны в жидком эквиваленте). Устойчивый снежный покров не формируется, после снегопада осадки перераспределяются и аккумулируются в виде снежников. По данным [29], над кровлей многолетнемерзлых пород в летний сезон происходит накопление воды и ее латеральная миграция.

Согласно [13], в пределах оазиса Холмы Ларсеманн идентифицировано 7 видов мхов, 25 видов лишайников и около 200 таксонов неморских водорослей.

Объекты исследований. Исследования выполняли в восточной части п-ова Брокнес в январе–феврале 2020 г. на четырех ключевых участках, характеризующих влажные и сухие местоположения в пределах двух долин, повышенный сухой участок с визуальными признаками засоления, а также участок с моховой экосистемой (рис. 1). Поскольку почвы оазиса Холмы Ларсеманн, как и других регионов Антарктики, формируются в условиях вечной мерзлоты, то, согласно всемирной классификации WRB (2015), они могут быть классифицированы как Cryosols или, согласно классификации почв USDA (Soil Taxonomy), — Gelisols. Принимая во внимание сложность классификации почв Антарктики в целом, полные названия почв могут быть даны после накопления достаточных для диагностики данных.

Общий вид обследованных участков и различных типов почв приведен на рис. 2 и 3, описание почвенных разрезов — в дополнительных материалах. Ниже кратко охарактеризованы ключевые участки.

Участок 1. Расположен на относительно ровном плато между холмами вблизи залива Нелла Фьорд (69°22.821' S; 76°22.608' E) с абсолютными отметками поверхности около 60 м над ур. м. Породы сильно выветрелы; скалы местами имеют ячеистую или плитчатую поверхность. Преобладают каменисто-щебнистые отложения от серовато-желтого, до темно-коричневого и красноватого оттенков, придающие территории пестрый окрас. Согласно [23], здесь на поверхность выходят оранжевые сиенограниты с повышенным содержанием биотитов. Выцветы (налеты) солей хорошо прослеживаются как на камнях и скалах, так и на рыхлых отложениях. На данном участке заложено две почвенные прикопки глубиной до 15 см и разрез глубиной 60 см.

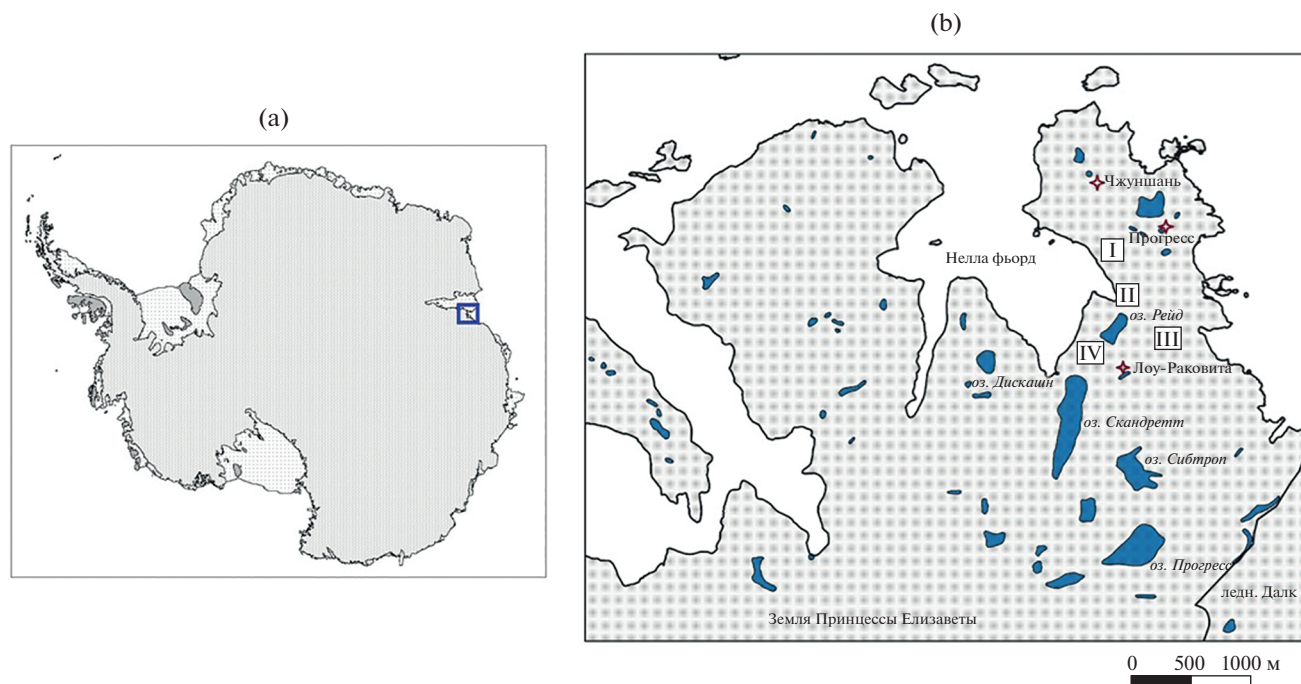


Рис. 1. Местоположение района исследований (а) и ключевых участков обследования почв на п-ове Брокнес, Холмы Ларсеманн (б). Ключевые участки показаны квадратом с номером внутри.

Участок II. Расположен под скалами у залива Нелла Фьорд ($69^{\circ}23.015' S$; $76^{\circ}22.689' E$) и представляет собой ветровое убежище для мхов. На скалах, обращенных к заливу, сохранились снежники. Породы сильно выветрелые, у самого подножия скал – продукты разрушения, мелкозем. Здесь под скалой – моховая экосистема площадью около 10 м^2 . Абсолютные отметки – около 5 м над ур. м.

Скальные породы выходят на поверхность и ступенчато спускаются к морю. Из-под скалы фрагменты мхов распространяются вниз по мелкозему. Здесь заложен разрез глубиной 35 см в пределах моховой экосистемы, а также прикопки с удалением от нее до 20 м по направлению к морю. Под скалой и рядом с ней отмечаются перья птиц и остатки продуктов жизнедеятельности.

Участок III. Расположен примерно в 1 км южнее станции Прогресс ($69^{\circ}23.143' S$; $76^{\circ}23.338' E$) и представляет долину между мелкопочными холмами, по которой протекает ручей, теряющийся в грунтах. Абсолютные отметки – около 35 м над ур. м. Пологие склоны долины покрыты делювием. Встречаются остатки снежников, которые в большей степени сохранились на восточном подветренном склоне. Днище и склоны долины сильно завалунены. По нижней части склона проходит дорога на взлетно-посадочную полосу.

По долине ручья распространены наземные водоросли, встречаются куртинки мхов, лишайники; в нижней его части доминируют нитчатые зеленые водоросли. В пределах долины заложены

почвенные прикопки глубиной до 20 см и 4 разреза (в пределах днища долины и на склоне на различном удалении). Глубина заложения варьирует от 60 см (вблизи водотока) до 100 см (на склоне). Повсеместно вскрыты грунтовые воды. В пределах переувлажненной части долины в почвенном профиле выделяется гумусово-слаборазвитый горизонт; признаков оглеения не отмечено. Отложения рыхлые, песчано-гравийные или песчано-гравийно-щебнистые. Температура почвы на глубине 1 м – $+1.9^{\circ}\text{C}$.

В данной долине выявлена глинистая линза площадью около 7 м^2 , которая выходит на поверхность.

Участок IV. Участок относится к водосбору оз. Скандретт ($69^{\circ}23.291' S$; $76^{\circ}22.344' E$). Абсолютная высота – около 15 м над ур. м. Склоны пологие, в некоторых местах крутые, скалистые. Имеются небольшие снежники. Талые снеговые воды снежников просачиваются вглубь и затем выклиниваются в долине, то есть подпочвенный сток становится напочвенным. Ручей течет по днищу долины, расчлняясь на несколько потоков. Общая протяженность ручья – около 200 м. По центру долины обильны черные водоросли, покрытие которых к озеру увеличивается. Склоны и днище долины сильно завалунены. По днищу долины от начала ручья и до падения в озеро заложены три почвенные прикопки. Примерно в центре долины заложены два разреза глубиной 40 см (т. 13) и 60 см (т. 15) с уровнем грунтовых вод соответственно 10 и 40 см.

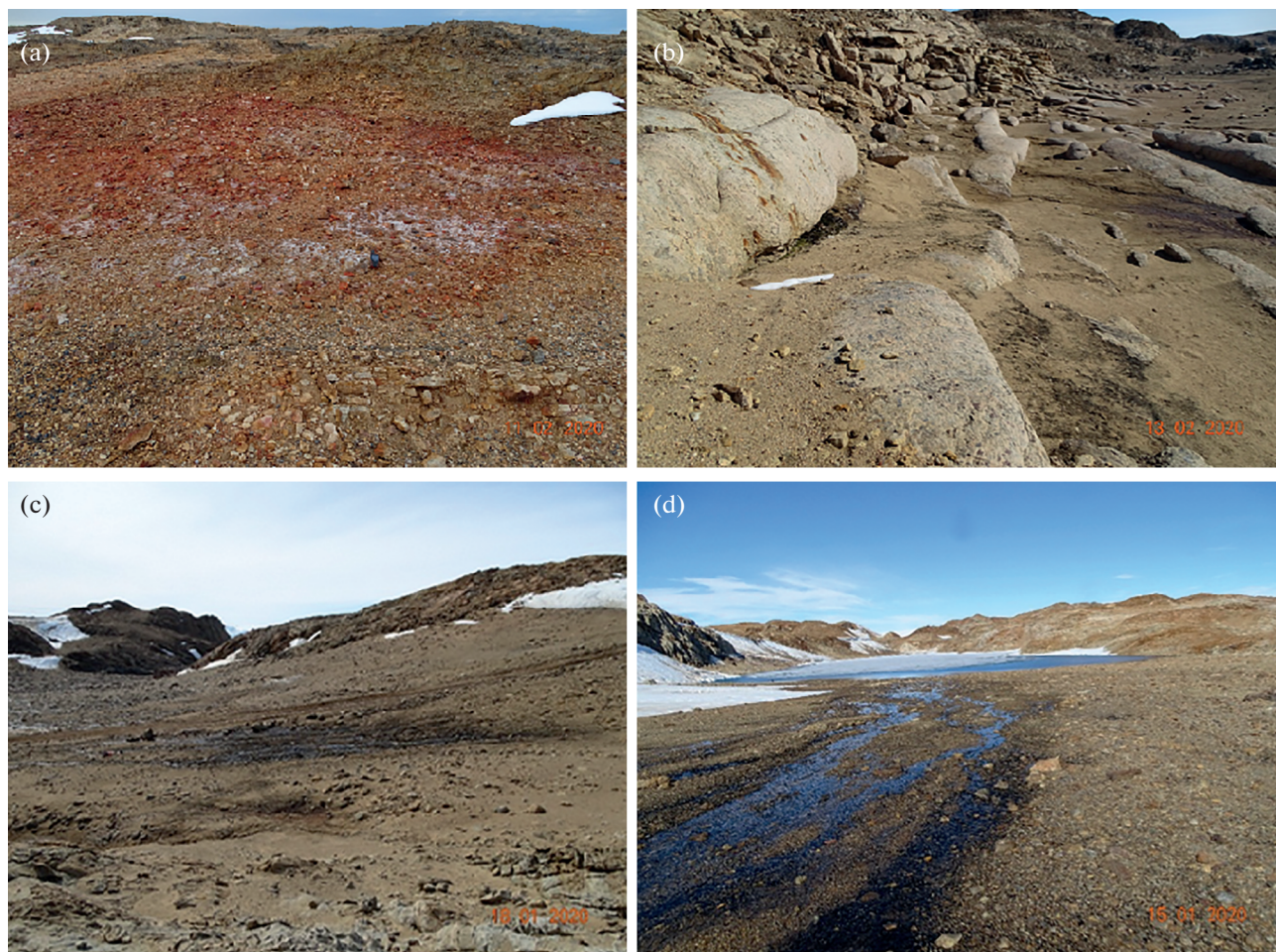


Рис. 2. Общий вид ключевых участков на п-ове Брокнес, Холмы Ларсеманн: а – участок I (место заложения разреза 64, прикопок 61–63); б – участок II (место заложения разреза 51, прикопок 437–441); с – участок III (место заложения разрезов 22, 31–33, прикопок 21, 23); д – участок IV (место заложения разрезов 13 и 15, прикопок 11–14) (фото Ю.Г. Гигиняка, 2020 г.).

Методы химико-аналитических исследований.

Пробы почвы отбирали в полиэтиленовые пакеты и/или в пластиковые емкости и хранили в холодном месте до доставки в г. Минск, Беларусь. Пробы высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали и просеивали через сито с круглыми отверстиями диаметром ≤ 1 мм.

Содержание мелкозема (фракции размером ≤ 1 мм) оценивали по результатам сухого ситования. Гранулометрический анализ проводили для частиц < 1 мм с использованием ареометрического метода. Содержание макрокомпонентного состава определяли методами фотометрии (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5), комплексонометрии (CaO , MgO), пламенной фотометрии (Na_2O , K_2O) и гравиметрии (SO_3). Потери при прокаливании оценивали весовым методом, основанном на определении потери массы навески пробы при температуре $950\text{--}1000^\circ\text{C}$. Содержание органического вещества и подвижного фосфора анализировали методом фотометрии, обменного кальция и магния –

комплексонометрии, обменного натрия и подвижного калия – пламенной фотометрии, общего азота – титриметрическим методом по Кьельдалю. Для определения pH_{KCl} готовили солевую вытяжку из почвы с использованием раствора хлористого калия при соотношении почвы и раствора 1 : 2.5.

Для определения водорастворимых солей в почве готовили водную вытяжку с использованием дистиллированной водой при отношении почвы к воде 1 : 5 с последующим фильтрованием суспензии (СТБ 17.13.05-36-2015). Содержание хлорид-иона исследовали титриметрическим методом, основанным на образовании труднорастворимого осадка хлорида серебра при добавлении раствора азотнокислого серебра к фильтрату водной вытяжки из анализируемой почвы. Метод определения сульфат-иона основан на осаждении иона сульфата хлористым барием и последующем турбидиметрическом определении его в виде сульфата бария. Содержания ионов натрия



Рис. 3. Примеры различных почв Cryosols на п-ове Брокнес, Холмы Ларсеманн: а – почвы на красноцветных породах с солевыми выцветами (разрез 64); б – почвы моховой экосистемы (разрез 51); в – переувлажненные почвы на днище долины (разрез 22); д – почвы сухого склона долины (разрез 33) (фото Ю.Г. Гигиняка, 2020 г.).

и калия определяли методом пламенной фотометрии, ионов кальция и магния – комплексно-нометрического титрования. Удельную электропроводность фильтрата водной вытяжки 1 : 5 и величину рН определяли с помощью кондуктометра и рН-метра соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гранулометрический состав. В почвах обследованных участков диапазон скелетной части (с размерами частиц >1 мм) варьирует от 0.3 до 76% (табл. 1). Более высокая доля скелетной части (52.4–76.0%) и соответственно минимальная доля мелкозема присуща почвам на участке I у залива Нелла Фьорд. Повышена доля мелкозема (до 60–84%) на участке II непосредственно в месте произрастания мхов и на расстоянии до 5 м. Для влажных долин в поверхностных горизонтах в большинстве случаев соотношения скелетной части и мелкозема примерно одинаковое с некоторыми вариациями в зависимости от местоположения. Преимущественно из мелкозема (99.7%) состоит проба почвы в пределах глинистой линзы, обнаруженной на участке III.

Доля мелкозема с глубиной увеличивается, при этом в его распределении не выявлено четких закономерностей. Так, на участке III в т. 32 (нижняя часть склона) максимальные значения отмечаются на глубине 20–50 см, а в т. 33 (выше по склону) – на глубине 90–100 см. Увеличение доли мелкозема вниз по почвенному профилю (до 75.4%) установлено и на участке IV в пределах долины у оз. Скандрет. На участке I (т. 64) доля мелкозема с глубиной сначала уменьшается, а затем увеличивается.

Состав мелкозема изучали на примере участков III и IV. Установлено, что практически во всех случаях доминирует песок, на долю которого приходится 90–96% общей массы мелкозема. Доля ила и глины варьирует соответственно в пределах 2.4–7.4 и 1.2–5%. При сходстве распределения мелких частиц, в почвенном профиле данных участков обнаружены некоторые различия. Так, почвы на участке IV, характеризующие днище влажной долины у оз. Скандретт (т. 13), содержат большее количество очень тонкого песка, ила и глины по сравнению с почвами на участке III (рис. 4а и 4б). При этом с глубиной в т. 13 отмечается незначительное их увеличение. Также увеличение содержания тонких фракций песка, ила и глины вниз по профилю отмечено в т. 32, заложеной в нижней части склона на участке III (рис. 4с). В почвах склона значительно больше доля тонкого песка, тогда как в почвах днищ долин обоих участков доминируют фракции среднего песка. Максимальные значения тонких фракций песка, ила и глины в т. 32 зафиксированы на глубине 20–50 см.

Сравнение состава мелкозема в поверхностных горизонтах почвы в начале и конце ручьев

различных долин (впадение в озеро на участке IV и исчезновение в грунтах на участке III) также позволило выявить некоторые различия. Если в долине у оз. Скандретт происходит увеличение доли тонкого и очень тонкого песка и ила по мере приближения к озеру (рис. 4е), то на участке IV количество глинистых частиц и ила в поверхностных горизонтах уменьшается с приближением к концу ручья (рис. 4д). Это свидетельствует о повышении рыхлости и дренированности пород влажной долины.

Особого внимания заслуживает проба почвы, отобранная в пределах глинистой линзы (т. 361), где доля песка составляет всего 14.5%, тогда как доля ила – 56.1% и глины – 29.4% (рис. 5).

Химический состав. Полученные данные по химическому составу почв по средним значениям близки к данным [35], которые характеризуют озерные отложения и отложения водосборов этого оазиса и указывают на гранитную природу пород. Среднее содержание диоксида кремния оценивается в 68%, оксидов алюминия – в 13.7%. Другие основные оксиды в порядке убывания расположились в ряд: Fe_2O_3 (7.6%) > K_2O (3.6%) > Na_2O (2%) > CaO (1.6%). Содержание других химических соединений составляет <1% (табл. 2). При сходстве химического состава почв в большинстве случаев, имеются и некоторые различия. Так, на участке I зафиксировано максимальное содержание SiO_2 и SO_3 , минимум – Al_2O_3 , TiO_2 и CaO .

По сравнению с континентальной корой [37] среднее содержание основных химических элементов в почвах п-ова Брокнес характеризуется повышенными значениями содержания оксидов железа и более низкими оксидов кальция, магния и натрия.

Кислотность, содержание $C_{\text{орг}}$, элементов питания и обменных оснований. По величине pH_{KCl} почвы обследованных участков относятся к кислым с вариациями от сильноокислых до слабокислых. Сильноокислые почвенные разновидности с pH_{KCl} в поверхностных горизонтах 4.1 и менее характерны для участка I у залива Нелла Фьорд (табл. 3). Установлено подкисление почв с глубиной; минимальное значение pH_{KCl} (3.5) зафиксировано на глубине 50–60 см.

Слабокислая среда характерна для почв долин, где значение pH_{KCl} находится в диапазоне 5.0–5.8. Почвы в пределах развития моховой экосистемы имеют среднекислую реакцию среды (pH_{KCl} 4.6–5.0).

В отношении $C_{\text{орг}}$ основные различия, как следовало ожидать, обусловлены наличием/отсутствием растительности. Максимальные значения (2.62%) характерны для участка II и зафиксированы в горизонте непосредственно под мхами со снижением до 1.12% на глубине 5–10 см. Однако высокое содержание $C_{\text{орг}}$ (1.86–2.08%) отмечается

Таблица 1. Соотношение скелетной части и мелкозема в почвах п-ова Брокнес, Холмы Ларсеманн

Участок, местоположение	Точка, привязка	Горизонт, глубина, см	Доля фракции, %	
			>1 мм	<1 мм
I, у залива Нелла Фьорд	61, 500 м 3 ст. Прогресс, признаки засоления на сером фоне	S/C ₁ , 0–5	76.0	24.0
		C ₂ , 10–15	72.4	27.6
	62, там же, у дороги на взлетно-посадочную полосу	S/C ₁ , 0–5	69.7	30.3
		C ₂ , 10–15	36.0	64.0
	63, там же, признаки засоления на красном фоне	S/C ₁ , 0–5	52.4	47.6
		C ₂ , 10–15	54.0	46.0
	64, в 20 м от т. 63	S/C ₁ , 0–5	59.9	40.1
		C ₂ , 5–10	62.8	37.2
		C ₃ , 15–20	72.3	27.7
		C ₄ , 30–40	66.7	33.3
C ₅ , 50–60		52.4	47.6	
II, моховая экосистема у залива Нелла Фьорд	51, под скалой	O, 0–2	32.1	67.9
		T+C, 5–10	44.9	55.1
		C ₁ , 10–18	33.7	66.3
	437, 2 м от т. 51	C ₂ , 20–35	35.8	64.2
		B _{moss} , 0–10	39.8	60.2
438, 5 м от т. 51	B _{moss} , 0–10	16.1	83.9	
441, 10 м т. 51	GP/C ₁ , 0–10	50.5	49.5	
III, влажная долина	21, днище долины, начало ручья	B _{algae} , 0–10	55.1	44.9
		B _{algae} , 0–10	57.7	42.3
	22, днище долины, 50 м ниже по ручью в 5 м от русла	B ₁ , 20–40	43.9	56.1
		GP/C ₁ , 0–10	53.3	46.7
	32, нижняя часть склона, 30 м от т. 22	C ₃ , 20–50	36.3	63.7
		C ₄ , 60–90	48.6	51.4
	23, днище долины, конец ручья	B _{algae} , 0–10	52.0	48.0
		363, глинистая линза	GP, 0–10	0.3
	33, выше по склону, 38 м от т. 22	GP/C ₁ , 0–10	58.9	41.1
		C ₃ , 30–40	54.6	45.4
C ₄ , 50–60		61.4	38.6	
IV, влажная долина у оз. Скандретт	13, днище долины, 150 м от озера	C ₄ , 90–100	42.4	57.6
		B _{algae} , 0–10	51.8	49.2
	11, днище долины, 200 м от озера	B ₂ , 20–40	46.2	53.8
		B _{algae} , 0–10	45.3	54.7
	14, днище долины, 50 м от озера	B _{algae} , 0–10	56.4	43.4
		GP/C ₁ , 0–10	49.4	50.6
	15, нижняя часть склона	C ₁ , 10–20	42.3	57.7
		C ₁ , 20–30	44.6	55.4
		C ₂ , 45–50	34.1	65.9
		C ₃ , 55–60	24.6	75.4

в поверхностном горизонте почв на расстоянии до 5 м от места произрастания мхов.

Повышенное содержание C_{орг} выявлено в почвах участка IV. При этом максимальные значения (1.71–1.82%) отмечаются на глубине до 20 см и приурочены к почвам днища долины оз. Скандретт, где наиболее активно развиваются водоросли. Аналогичные значения C_{орг} (1.84%) свой-

ственны почвам участка III, центральной части днища долины с водорослями. На участках долин, где визуально присутствие водорослей незаметно, содержание C_{орг} уменьшается, составляя около 1% (т. 15, 31). Выше по склонам (т. 32 и 33) содержание C_{орг} закономерно уменьшается примерно до 0.5%. Наименьшее содержание C_{орг} зафиксировано на участке I.

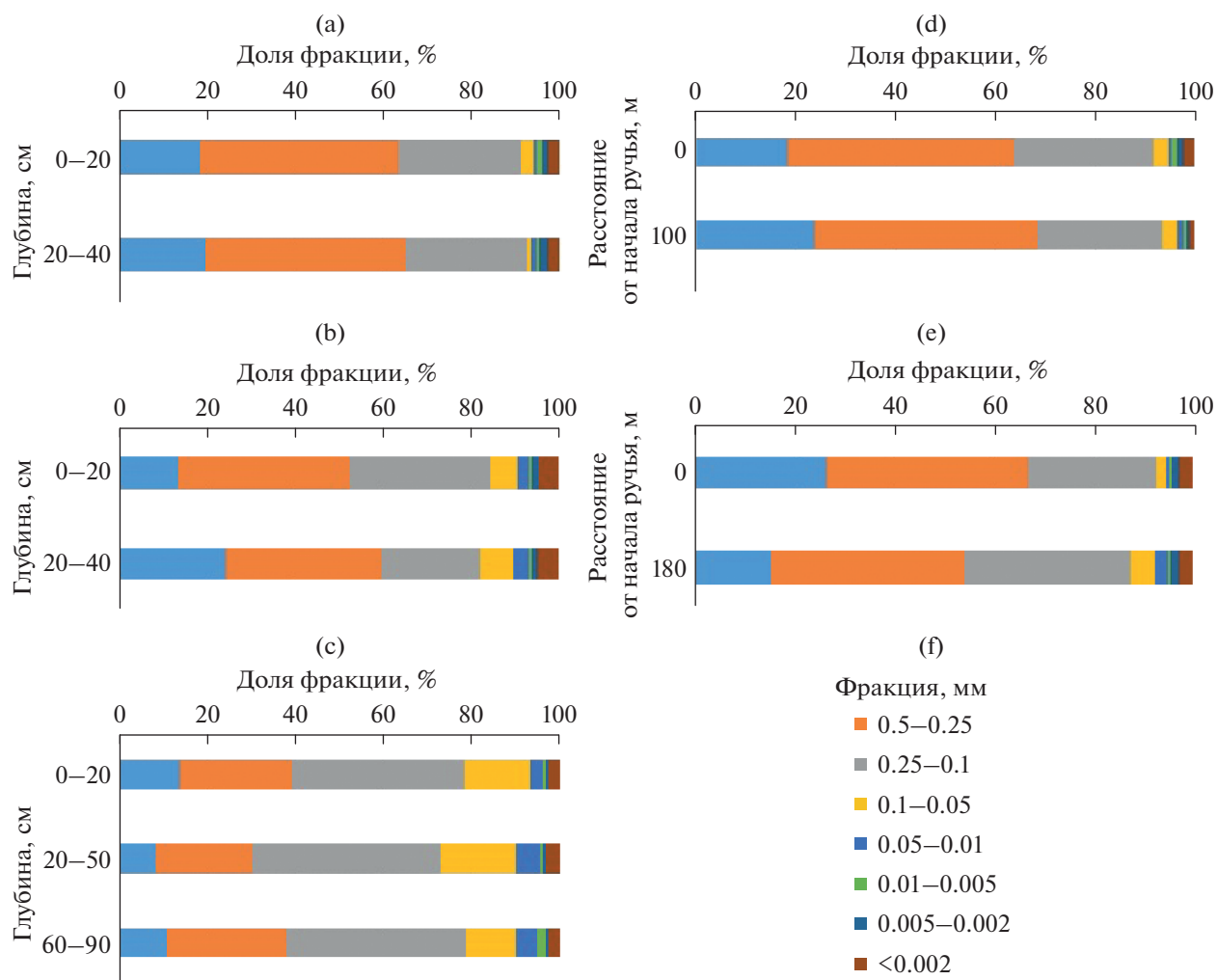


Рис. 4. Изменение гранулометрического состава почв на ключевых участках п-ова Брокнес, Холмы Ларсеманн: с глубиной: а – разрез 22 (днище долины на участке III); б – разрез 13 (днище долины на участке IV); с – разрез 32 (склон на участке III); с удалением от начала ручья: d – на участке III; e – на участке IV; f – размер фракций, мм.



Рис. 5. Общий вид глинистой линзы (а) и пробы почвы (б) (фото Ю.Г. Гигиняка, 2020 г.).

Таблица 2. Химический состав почв п-ова Брокнес, Холмы Ларсеманн, % от прокаленной навески

Участок	Точка	Горизонт, глубина, см	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /R ₂ O ₃
I	63	C ₂ , 10–12	73.6	8.9	5.2	0.04	0.19	0.14	3.37	0.01	3.35	1.13	0.01	14.1	5.2
II	439	B _{moss} , 0–10	66.3	7.3	14.6	0.79	1.51	1.63	0.05	0.09	3.85	2.19	0.05	4.6	3.1
		B ₂ , 10–20	66.6	7.4	15.4	0.84	1.88	1.08	0.02	0.12	3.50	2.34	0.07	4.3	2.9
III	31	C ₃ , 50–60	63.9	9.5	15.3	1.30	1.88	2.00	0.03	0.11	3.26	2.10	0.10	4.2	2.6
		C ₄ , 80–90	67.0	6.8	14.5	0.19	3.02	0.14	0.03	0.11	3.73	1.93	0.07	4.7	3.2
IV	12	B _{algae} , 0–10	67.9	7.3	14.9	0.85	1.13	1.08	0.04	0.10	4.20	1.71	0.08	4.6	3.1
	15	B ₁ , 10–20	68.4	7.2	14.8	0.82	1.13	1.08	0.02	0.09	4.18	1.74	0.08	4.6	3.1
		C ₃ , 55–60	67.9	6.4	14.5	0.75	1.88	1.35	0.02	0.10	4.48	1.91	0.06	4.7	3.3
		Отложения озер и водосборов оазиса Холмы Ларсеманн [35]	65.0	4.4	14.2	0.51	3.81	1.16	–	0.16	3.65	2.08	0.07	4.2	3.5
		Верхняя континентальная кора [37]	66.6	5.0	15.4	0.64	3.59	2.48	–	0.15	2.8	3.27	0.10	4.3	3.3

Таблица 3. Основные свойства почв ключевых участков п-ова Брокнес, Холмы Ларсеманн

Участок	Точка	Горизонт, глубина, см	pH _{KCl}	C _{орг} , %	N _{общ} , %	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺ _{обм}	Mg ²⁺ _{обм}	Na ⁺ _{обм}	Гидролитическая кислотность	Na ⁺ _{обм} , %
						подвиж	подвиж					
						мг/кг		смоль(экв)/кг				
I	63	S/C ₁ , 0–5	4.1	0.13	0.04	20.8	208.9	0.95	2.16	1.74	1.34	35.9
	64	S/C ₁ , 0–5	4.1	0.97	0.04	29.0	217.3	0.95	1.08	1.02	1.18	33.4
		C ₂ , 5–10	3.7	0.01	0.02	8.5	63.0	0.20	0.20	0.26	1.67	39.4
		C ₃ , 15–20	3.7	0.02	0.02	9.2	65.8	0.27	0.41	0.27	1.70	28.4
		C ₄ , 30–40	3.6	0.01	0.03	8.5	72.4	0.27	0.54	0.49	2.31	37.7
		C ₅ , 50–60	3.5	0.26	0.05	8.8	65.7	0.34	0.68	0.80	2.31	44.0
II	51	O, 0–2	5.0	2.62	0.34	70.1	19.1	0.81	0.95	0.14	1.70	7.4
		T+C, 5–10	4.8	1.12	0.42	108.8	36.6	1.22	1.35	0.14	2.80	5.2
	437	B _{moss} , 0–10	4.7	1.86	0.35	117.8	71.0	1.15	1.42	0.10	2.25	3.7
	438	B _{moss} , 0–10	5.8	2.08	0.16	91.9	48.0	0.54	0.41	0.05	0.47	5.0
	441	GP/C ₁ , 0–10	5.4	0.93	0.15	49.4	30.5	0.54	0.41	0.13	0.63	12.0
III	21	B _{algae} , 0–10	5.3	0.86	0.10	108.2	48.2	0.41	0.68	0.05	0.67	4.4
	22	B _{algae} , 0–10	5.2	1.84	0.20	70.2	45.8	0.54	0.81	0.05	0.76	3.6
	31	C ₁ , 5–10	5.4	1.01	0.12	70.4	20.0	0.41	0.68	0.18	0.60	14.2
		C ₂ , 20–30	5.3	1.31	0.13	56.8	40.1	0.41	0.95	0.15	0.67	9.9
	32	GP/C ₁ , 0–10	5.1	0.61	0.05	72.7	20.0	0.41	0.41	0.05	0.66	5.7
		C ₂ , 10–20	5.0	0.45	0.04	83.1	20.0	0.27	0.54	0.05	0.63	5.8
	33	GP/C ₁ , 0–10	5.7	0.43	0.06	81.7	73.1	0.27	0.68	0.16	0.51	14.4
		C ₂ , 10–20	5.1	0.49	0.05	67.6	42.5	0.27	0.41	0.05	0.66	6.8
IV	13	B _{algae} , 0–10	5.8	1.71	0.20	52.2	70.7	0.68	1.35	0.23	0.61	10.2
		B ₁ , 10–20	5.1	1.82	0.16	43.1	48.3	0.54	1.22	0.14	0.70	7.4
	15	GP/C ₁ , 0–10	5.0	1.00	0.11	71.4	114.4	0.27	0.41	0.41	0.64	37.6

В распределении содержания общего азота прослеживается близкая к $C_{\text{орг}}$ ситуация: максимальные значения (0.24–0.42%) характерны для моховой экосистемы. О тесной связи между $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$ свидетельствует статистический анализ: коэффициент корреляции (r) оценивается в 0.77 (при $p = 0.001$).

В отношении P_2O_5 прослеживается определенная связь с содержанием $N_{\text{общ}}$ и $C_{\text{орг}}$, что, вероятно, связано с их общими источниками поступления, включая растительные остатки и орнитогенный фактор (перья или их фрагменты обнаружены на различных участках). В частности, теснота связи между $N_{\text{общ}}$ и P_2O_5 оценивается величиной 0.63. Максимальные значения P_2O_5 (117.8 мг/кг почвы) приурочены к моховой экосистеме, хотя отмечается значительная вариабельность содержания даже в пределах небольшого участка. Повышенные концентрации P_2O_5 (70.4–108.2 мг/кг почвы) выявлены в почвах участка III, где по остаткам перьев и продуктов жизнедеятельности можно судить о влиянии птиц на почвы. При этом в отдельных случаях содержание P_2O_5 даже на глубине до 20 см составляет до 80 мг/кг. Наименьшее содержание P_2O_5 в оазисе Холмы Ларсеманн отмечается в почвах на засоленном участке. Напротив, именно здесь повышено содержание подвижного калия (до 209–217 мг/кг).

Сумма обменных оснований в поверхностных горизонтах почвы варьирует от 0.87 до 4.85 смоль(экв)/кг, достигая наибольших значений на участке I. Подтверждением засоления почв являются данные о доле обменного натрия, составляющей 33–35% в поверхностных горизонтах и до 44% по почвенному профилю.

В большинстве случаев (62%) среди обменных оснований доминируют ионы магния, что свидетельствует о влиянии морских аэрозолей. Коэффициент корреляции суммы обменных оснований наибольший с обменным магнием (0.93), тогда как с обменным кальцием – 0.79 и с обменным натрием – 0.76.

Более высокое содержание обменного кальция характерно для почв моховой экосистемы – 0.81–1.22 смоль(экв)/кг. Обменный кальций тесно коррелирует с содержанием общего азота ($r = 0.70$).

Насыщенность основаниями составляет 73–78% в почвах долины у оз. Скандрет. На засоленном участке показатели насыщенности достигают 72–78% в горизонте 0–5 см.

Содержание водорастворимых соединений. Для получения информации о выщелачивании химических элементов из почв анализировали почвенно-грунтовые воды из разрезов, заложенных в пределах долин, а также водные вытяжки из почв (табл. 4).

В почвенных вытяжках максимальное содержание компонентов солевого состава выявлено на участке I, где их сумма в поверхностном горизонте достигает 173.4 мг/100 г почвы (удельная электропроводность водной вытяжки 1 : 5 – 791 мкСм/см; состав хлоридный натриевый).

На участке III большие концентрации солей характерны для разреза 31: величина удельной электропроводности вытяжки 1 : 5 в верхнем горизонте составляет 72.2 мкСм/см, тогда как на глубине 30–60 см – 38.2 мкСм/см. Содержание водорастворимых солей в почвах разрезов, заложенных на более высоких отметках рельефа, заметно снижается и составляет в верхних горизонтах 11.6 и 17.6 мг/100 г почвы.

Среди катионов в почвах на участке III доминируют ионы натрия, среди анионов – хлориды с высокой долей сульфатов и/или гидрокарбонатов, что может быть следствием процессов выщелачивания горных пород, как указано в [38].

Почвенно-грунтовые воды на участке III более минерализованы по сравнению с водной вытяжкой из почв: сумма ионов находится в диапазоне 122.2–140.9 мг/100 г, удельная электропроводность вытяжки 1 : 5 – 198.6–285.1 мкСм/см. По составу воды хлоридные натриевые: на долю хлорид-ионов приходится 82–90%-экв суммы анионов, ионов натрия – 76–80%-экв суммы катионов.

В почвенно-грунтовых водах на участке IV сумма ионов варьировала от 118.5 до 444.4 мг/100 г почвы, величина удельной электропроводности вытяжки 1 : 5 – от 237.6 до 778.5 мкСм/см. Отмечается увеличение содержания макрокомпонентов от начала ручья, достигая максимальных значений примерно через 100 м, затем происходит некоторое уменьшение. Почвенно-грунтовые воды хлоридно-натриевые по составу на всем протяжении. По сравнению с предыдущей долиной содержание компонентов солевого состава больше, что может быть следствием более открытого положения по отношению к поступлению морских аэрозолей из залива Нелла Фьорд.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали, что почвы п-ова Брокнес, как и других оазисов Антарктиды, преимущественно скелетные, неструктурированные, в большинстве случаев без выраженных классических генетических горизонтов и признаков оглеения. Вместе с тем в ряде случаев почвенный профиль дифференцируется с выделением слаборазвитых органогенного и минерально-органогенного горизонтов (т. 51), водорослевого поверхностного (т. 12–15, 21–23), солевой поверхностной корки (т. 61, 63, 64), каменной или щебнистой корки (т. 32, 33). Иногда имеются визуально диагностируемые изменения гранулометрического состава почв с глубиной (т. 15, 22, 32); в

Таблица 4. Химический состав почвенно-грунтовых вод (мг/л) и водной вытяжки из почв (мг/100 г почв), отобранных на п-ове Брокнес, Холмы Лар-семанн

Участок	Тип пробы	Точка	Горизонт, глубина, см	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма ионов	Электропроводность, мксм/см	
I	Водная вытяжка 1:5	61	S/C ₁ , 0–5	6.9	12.8	80.8	11.2	0.2	0.10	2.00	1.82	60.8	3.75	173.4	791.1	
		31	C ₂ , 10–12 GP/C ₁ , 0–5	6.9	0.0	41.6	6.3	0.5	0.04	1.00	0.61	35.1	2.13	87.3	427.4	
III	»	32	C ₂ , 10–20 C ₃ , 30–60 GP/C ₁ +C ₂ , 0–20	5.8	7.8	5.5	3.3	2.2	0.03	0.00	0.00	0.19	7.2	0.80	26.7	57.3
		33	C ₄ , 60–90 GP/C ₁ +C ₂ , 0–20	6.8	3.8	3.9	1.8	0.1	0.00	0.00	0.00	0.29	4.4	0.45	14.6	38.2
		284	C ₄ , 90–100	6.3	2.4	1.5	2.5	1.8	0.00	0.00	0.00	0.43	2.7	0.45	11.6	26.3
		282		6.0	2.4	1.6	2.7	0.1	0.00	0.00	0.00	0.19	4.4	0.25	9.4	21.3
IV	Почвенно-грунтовые воды	283		6.5	3.2	2.6	6.6	0.1	0.10	0.00	0.42	2.2	0.45	10.3	26.6	
		280		5.6	3.1	2.4	1.7	0.1	0.00	0.00	0.42	2.2	0.45	10.3	26.6	
		260		5.6	1.0	58.4	13.0	4.6	0.01	0.01	1.61	4.70	44.1	2.50	129.9	211.2
		259		5.9	1.5	60.0	6.2	1.9	0.01	0.01	2.07	5.42	42.9	2.20	122.2	198.6
		261		5.5	1.0	66.7	10.8	3.1	0.01	0.01	1.83	5.04	50.2	2.24	140.9	235.1
		262		5.8	1.0	63.4	12.3	2.6	0.04	0.04	0.39	1.42	34.7	2.69	118.5	237.6

пределах переувлажненных участков долин отмечаются признаки аллювиальных почв с включениями камней окатанных форм (т. 13, 15, 22). Это указывает на разнообразие почвообразующих факторов и их роль в формировании почв полуострова и их свойств.

В пределах ветрового убежища важную роль играет биотический фактор благодаря благоприятным условиям для развития мхов. Именно на участке II зафиксировано максимальное содержание $C_{орг}$, $N_{общ}$ и P_2O_5 , источником поступления которых являются остатки мхов после их отмирания и иссушения. Как показано в предыдущем разделе, повышенное (по антарктическим меркам) содержание органического углерода и подвижных элементов питания характерны не только для собственно моховой экосистемы, но наблюдаются и за ее пределами, что связано с ветровым переносом фрагментов торфа и мелкозема из-под скалы в направлении к морю. Важную роль играет орнитогенный фактор, на что указывают многочисленные перья и остатки продуктов жизнедеятельности птиц. В последние годы образование органического вещества в почвах Антарктики, помимо мест гнездовых пингвинов, связывают с деятельностью летающих морских птиц, которые переносят остатки пищи, отходы жизнедеятельности, мезо- и микробиоты [2, 3]. Принимая во внимание свойства почв моховой экосистемы участка II, они могут быть отнесены к Skeletic Leptic Cryosols, согласно WRB [28]. Следует отметить, что почвы под мхами, сформированные в пределах ветровых убежищ, имеются и в других регионах Антарктики: в оазисе Ширмахера [39], Земле Мэри Бэрд [8], о. Ливингстон [27]. В оазисе Холмы Ларсеманн такие почвы упоминаются в работе [11].

Иные факторы почвообразования характерны для участка I, представленного красноцветными породами с визуально диагностируемыми признаками засоления. К основным из них относятся литологические особенности территории в сочетании с более высоким по отношению к другим участкам гипсометрическим уровнем и открытостью к воздействию морских масс. Формирование почв с крайне низким содержанием $C_{орг}$ и $N_{общ}$, а также P_2O_5 обусловлено отсутствием растительности и в целом низкой ролью биогенного фактора.

Рассматривая участок I, необходимо подчеркнуть, что именно для него зафиксирована максимальная величина суммы обменных оснований, а также высокая доля обменного натрия (до 37–44%) в почвенном поглощающем комплексе, что типично для солонцов. Кроме того, именно для данного участка характерно наибольшее содержание подвижного калия (208–217 мг/кг почвы). Дополнительной характеристикой почв данного участка является хлоридный натриевый состав

водной вытяжки, а также повышенная величина удельной электропроводности водной вытяжки 1 : 5 (до 791 мкСм/см). Возможно, название почв в соответствии с WRB [28] – Skeletic Salic Cryosols.

Засоление почв красноцветов может быть обусловлено как привнесением морских солей (на что указывает высокая доля обменного магния), так и образованием карбонатов в ходе выветривания силикатов *in situ*, поскольку по сравнению с другими участками в составе солей повышено содержание бикарбонатов, кальция и магния (табл. 5). Интересным представляется генезис красноцветных пород, что требует дополнительных исследований. Как показано Глазовской в 1958 г. [4], выветривание гранитов и гранитогнейсов сопровождается разрушением железосодержащих минералов, а пелитизация полевых шпатов сопровождается образованием глинистого вещества красновато-коричневого цвета.

О глубокой выветрелости горных пород на данном участке свидетельствует не только вскрытая глубина рыхлых отложений в 60 см (вероятно, не предельная), но и значительная доля мелкозема, достигающая в ряде случаев 46–48%. Отличительная особенность свойств почв данного ключевого участка – четко выраженное уменьшение содержания органического вещества, подвижных элементов питания и обменных катионов вниз по почвенному профилю. Представляется, что почвы ключевого участка I, развитые на красноцветных породах, могут быть более древними по сравнению с другими участками оазиса. Рассчитанные соотношения SiO_2/Al_2O_3 (14.2) и SiO_2/R_2O_3 (5.2) характеризуют более высокую интенсивность процессов химического выветривания (для других участков соотношение $SiO_2/Al_2O_3 = 4.2–4.7$, $SiO_2/R_2O_3 = 2.6–3.2$), что может быть результатом наследования прошлых этапов развития района.

В пределах влажных долин участков III и IV доминирующая роль в накоплении и перераспределении вещества и химических элементов принадлежит водным потокам. При этом гидрологический фактор играет определяющую роль на самых низких гипсометрических уровнях, в пределах днищ долин, которые в течение летнего антарктического сезона превращаются в супер- или субаквальные ландшафты. Свойственные постоянно или периодически переувлажненным почвам хорошо развитые водорослевые сообщества способствуют ее обогащению органическим веществом, а рыхлый характер отложений и водные потоки – его перемещению вглубь почвенных горизонтов. Согласно полученным результатам, на обследованных участках влажных долин в поверхностных горизонтах (0–10 см) и на глубине (10–20 см) содержание органического вещества сопоставимо и находится в диапазоне 1–2%. Как следует из недавних исследований в оазисах Холмы Ларсеманн

Таблица 5. Соотношение содержания основных ионов в различных типах вод п-ова Брокнес, Холмы Ларсеманн, ммоль(экв)/л

Участок	Тип вод	SO ₄ /Cl	NO ₃ /Cl	Na/Cl
I	Водная вытяжка	0.107	0.004	1.23
III	Водная вытяжка	0.875	0.209	2.13
	Грунтовые	0.120	0.030	1.14
IV	Грунтовые	0.109	0.012	0.89
	Поверхностные	0.046	0.001	0.92
Оз. Рейд				
Морская вода [43]		0.051	0.009	0.857

и Ширмахера, в некоторых случаях даже в почвах без видимого растительного покрова пул углерода сравним с показателями для почв с мохово-лишайниковым покровом [34]. Лупачевым с соавт. [9] показано, что криптоорганогенные горизонты могут быть обнаружены в очень широком диапазоне локальных условий.

Особого внимания заслуживает происхождение глинистого участка, выявленного в пределах влажной долины на участке III, не перекрытого сверху ни щебнистым, ни песчано-гравийным материалом. Пока о таких находках не было сообщений в научной литературе, и генезис глины сложно объяснить. Процессы солифлюкции и химического выветривания не исключаются так же, как перенос и аккумуляция глинистых частиц в микропонижениях, как указано [1]; однако требуются дополнительные исследования.

Некоторая слоистость песчаных и песчано-гравийных отложений на участке IV, зафиксированное увеличение количества глинистых частиц с глубиной и с удалением от начала ручья, окатанные формы камней – все это позволяет рассматривать почвы влажных местообитаний долин как аналоги слабо развитых аллювиальных почв, которые могут быть отнесены, согласно WRB [28], к Skeletic Cryosols (Fluvis).

На склонах долины на участке IV, как и в других долинах оазиса [11], развитие растительности и формирование органогенных горизонтов сдерживается недостатком влаги, особенно в поверхностных горизонтах. Рыхлый характер отложений способствует быстрому переводу талых вод во внутрипочвенный сток, который является одним из важнейших факторов транспорта материала и переноса химических веществ. Результаты исследования показали, что в поверхностных горизонтах почв сопряженного ряда элементарных ландшафтов проявляется общая закономерность в увеличении $S_{орг}$, $N_{общ}$ и обменного кальция вниз по склону: от 0.43, 0.06% и 0.27 смоль(экв)/кг (т. 33) до 1.01, 0.13% и 0.41 смоль(экв)/кг (т. 31) соответственно. В отношении других элементов нет зависимости их содержания от местоположения. Обращают на себя внимание незначительные различия основных свойств почв поверхностных горизонтов (GB/V₁, 0–10 см) и на глубине (B₂, 10–

20 см). Пока недостаточно данных для выявления латеральных и радиальных изменений свойств почв, формирующихся на склонах. Потребуется более дифференцированный отбор проб почв и их химико-аналитические исследования. Можно лишь предположить, что как гранулометрический состав почв склонов, так и их химические свойства в значительной степени определяются гравитационными процессами, помимо процессов промерзания–оттаивания, варьирования уровня грунтовых вод и глубины протаивания почвы. По данным [45], перемещению почвенных материалов в различных направлениях, в том числе вверх, способствуют криотурбационные процессы. Вертикальное перемещение тонких фракций возможно при фильтрации латерально привнесенных взвесей, а также при изменении уровня надмерзлотных суспензий [11]. Предварительно на основании имеющихся данных почвы склонов долин могут быть отнесены к Skeletic Turbic Cryosols.

Сравнение элементов питания в почвах п-ова Брокнес в другими регионами Антарктики показало, что содержание подвижного фосфора ниже, чем в оазисе Вечерний [7] и на п-ове Файлдс, где максимальные концентрации достигли 2.5 г/кг [2]. Соответственно, можно предположить, что влияние орнитогенного фактора здесь меньше, чем в указанных регионах.

С другой стороны, такой фактор, как воздействие морских солей, оказывает более существенное влияние по сравнению с оазисом Вечерний [7]. Результаты анализа водной вытяжки и почвенно-грунтовых вод демонстрируют в ряде случаев сходство с морской водой (по соотношению ионов). Это касается в первую очередь участка I, а также оз. Рейд, расположенного между ключевыми участками II и IV. Согласно [43], значительные отличия в соотношениях анионов означают разные процессы растворения и выщелачивания из пород. Наиболее существенные отличия водной вытяжки для участка III указывают на преобладающую роль именно процессов выщелачивания.

Несомненно, полученные данные характеризуют лишь весьма небольшую территорию оазиса и не охватывают всего разнообразия и возможного диапазона показателей физических и химических свойств почв. Например, принимая во вни-

мание данные [29], можно говорить о гораздо большей вариабельности свойств почв, поскольку зафиксированная авторами величина удельной электропроводности подземного стока достигала 3740 мкСм/см.

В целом неоднородность почвенного покрова в пределах п-ова Брокнес согласуется с результатами для других регионов Антарктики [5, 22, 42]. Выявленные особенности гранулометрического и химического состава почв, зафиксированный диапазон содержания основных элементов питания и уровни содержания водорастворимых компонентов свидетельствуют о пространственной изменчивости факторов почвообразования и их разной роли в формировании почв. Не рассматривалось влияние антропогенной деятельности, начатой в 1990-х годах и возрастающей со временем. Как показано в работах [20, 24, 40], ее последствия пока носят локальный характер. Можно предположить, что вследствие техногенного воздействия в районах расположения научных станций увеличится полидисперсность почв и, соответственно, произойдет изменение их химических свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты почвенно-геохимических исследований, выполненные на четырех ключевых участках в восточной части п-ова Брокнес, Холмы Ларсеманн, позволяют сделать следующее заключение:

– почвы всех участков характеризуются полидисперсностью с содержанием мелкозема от 24 до 99.3% и доминированием в его составе практически во всех случаях песка. Выявленная впервые для данного района глинистая линза (доля ила – 56.1% и глины – 29.4%) среди песчано-гравийно-щебеночных отложений требует дальнейших исследований для оценки ее происхождения;

– почвы преимущественно скелетные, неструктурированные, в большинстве случаев без выраженных классических генетических горизонтов и признаков оглеения. В ряде случаев почвенный профиль дифференцируется с выделением слаборазвитых органогенного и минерально-органогенного горизонтов, водорослевого поверхностного, солевой поверхностной корки, каменистой или щебнистой корки;

– вариабельность химических свойств почв определяется разнообразием условий почвообразования. Наибольшее содержание органического вещества, подвижного фосфора и обменного кальция характерно для почв моховой экосистемы, а также переувлажненных местообитаний влажных долин;

– неоднородность почвенного покрова оазиса обусловлена различным вкладом почвообразующих факторов с доминированием литогенного в пределах ключевого участка I, биогенного –

участка II, геоморфологического – склонов долин на участке III, гидрологического и биогенного – в пределах днищ долин на участках III и IV. В соответствии с международной классификацией выделены следующие типы почв: Skeletic Leptic Cryosols (в ветровом убежище), Skeletic Salic Cryosols (на засоленном участке), Skeletic Turbic Cryosols (на склонах долин), Skeletic Fluvic Cryosols (для переувлажненных участков долин).

Полученные данные о геохимических свойствах почв могут быть использованы как основа последующих оценок функционирования наземных экосистем в зависимости от климатических изменений и антропогенных нагрузок.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственной программы “Мониторинг полярных районов Земли, создание Белорусской антарктической станции и обеспечение деятельности полярных экспедиций на 2016–2020 годы”. Авторы выражают благодарность руководству 12-ой Белорусской антарктической экспедиции и 65-ой Российской антарктической экспедиции, а также начальнику антарктической станции “Прогресс” Д.А. Мамадалиеву за содействие в проведении исследований, организации хранения и транспортировки проб. Авторы выражают признательность М.А. Кудрович за выполненные химико-аналитические определения состава почвенных вытяжек и грунтовых вод, Ю.Г. Кокош и В.Д. Чернюку за пробоподготовку почв.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Описание почвенных разрезов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы утверждают об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов Е.В.* Гранулометрический состав почв Западной Антарктики // Почвоведение. 2010. № 3. С. 324–332
<https://doi.org/10.1134/S1064229310030075>
2. *Абакумов Е.В.* Роль птиц в формировании режима элементов питания в почвах полуострова Файлдс (Западная Антарктика) // Русский орнитологический журн. 2018. Т. 27. С. 2757–2760.
3. *Абакумов Е.В., Парникоза И.Ю., Жиянски М., Янева Р., Лупачев А.В., Андреев М.П., Власов Д.Ю., Риано Дж., Харамильо Н.* Орнитогенный фактор почвообразования в Антарктике (обзор) // Почвоведение. 2021. № 4. С. 451–464.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2104002X>
4. *Глазовская М.А.* Выветривание и первичное почвообразование в Антарктиде // Научные доклады высшей школы. Геол.-геогр. науки. 1958. № 1. С. 63–76.

5. Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О. Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. № 1. С. 5–19. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19010040>
6. Кудинова А.Г., Петрова М.А., Долгих А.В., Соина В.С., Лысак Л.В., Маслова О.А. Таксономическое разнообразие бактерий и их фильтрующих форм в почвах Восточной Антарктиды (Оазисы Холмы Ларсеманн и Холмы Бангера) // Микробиология. 2020. Т. 89. № 5. С. 581–592. <https://doi.org/10.31857/S0026365620050134>
7. Кухарчик Т.И., Какарека С.В. Состав и свойства почв района горы Вечерней (Земля Эндерби, Восточная Антарктида) // Докл. Национальной академии наук Беларуси. 2016. Т. 60. № 1. С. 87–93.
8. Луначев А.В., Абакумов Е.В. Почвы Земли Мэри Бэрд (Западная Антарктика) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1167–1180. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13100079>
9. Луначев А.В., Абакумов Е.В., Абрамов А.А., Добрянский А.С., Долгих А.В., Зазовская Э.П., Мергелов Н.С., Осокин Н.И., Шоркунов И.Г., Горячкин С.В. Почвенный покров и многолетнемерзлые породы Антарктиды: структура и функционирование // Вопросы географии. Сб. 150. Исследования Антарктиды. М., 2020. С. 242–285.
10. Мергелов Н.С., Горячкин С.В., Шоркунов И.Г., Зазовская Э.П., Черкинский А.Е. Эנדолитное почвообразование и скальный “загар” на массивно-кристаллических породах в восточной Антарктике // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1027–1044.
11. Мергелов Н.С. Почвы влажных долин в оазисах Ларсеманн и Вестфолль (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1027–1045. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090093>
12. Никитин Д.А., Семенов М.В. Субаквальные почвы Антарктиды: условия формирования и перспективы микробиологических исследований // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 49–69. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-49-69>
13. План управления Особо управляемым районом Антарктики “Холмы Ларсеманн”, Восточная Антарктика. Мера 15 (2014 г.) Приложение. Заключительный отчет XXXVII КСДА.
14. Соина В.С., Газимуллина А.Г., Мергелов Н.С., Лысак Л.В., Лапыгина Е.В. Бактериальные комплексы в почвах влажных долин оазиса Ларсеманн (Восточная Антарктида) // Альманах современной науки и образования. 2012. № 9. С. 195–200.
15. Сократова И.Н. Антарктические оазисы: история и результаты исследований. СПб., 2010. 274 с.
16. Abakumov E., Lupachev A., Yaneva R., Zhiyanski M. Micromorphological structure of maritime antarctic cryosols (King-George and Livingston Islands, West Antarctica) // Czech Polar Rep. 2021. V. 11. P. 318–332. <https://doi.org/10.5817/CPR2020-1-2>
17. Alekseev I., Abakumov E. Permafrost table depth in soils of Eastern Antarctica oases, King George and Ardley Islands (South Shetland Islands) // Czech Polar Rep. 2020. V. 10. P. 7–22.
18. Alekseev I., Zverev A., Abakumov E. Microbial communities in permafrost soils of Larsemann Hills, Eastern Antarctica: Environmental Controls and Effect of Human Impact // Microorganisms. 2020. V. 8. P. 1202. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8081202>
19. Antarctic soils and soil forming processes / Ed. E. Tedrow. Antarctic Research Series. Washington: American Geophysical Union of the National Academy of Sciences-National Research Council. 1966. V. 8. Publication No. 1418.
20. Bhakta S., Rout T.K., Karmakar D., Pawar C., Padhy P.K. Trace elements and their potential risk assessment on polar ecosystem of Larsemann Hills, East Antarctica // Polar Sci. 2022. P.1 00788. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2022.100788>
21. Campbell I.B., Claridge G.G.C. Antarctica: soils, weathering processes and environment. Amsterdam: Elsevier, 1987. 368 p.
22. Cannone N., Wagner D., Hubberten H.W., Guglielmin M. Biotic and abiotic factors influencing soil properties across a latitudinal gradient in Victoria Land, Antarctica // Geoderma. 2008. V. 144. P. 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.008>
23. Carson C.J., Grew E.S. Geology of the Larsemann Hills, Antarctica First Edition (1 : 25000 scale map). Geoscience Australia, Canberra, 2007.
24. Goldsworthy P., Canning E.A., Riddle M.J. Soil and water contamination in the Larsemann Hills, East Antarctica // Polar Record. 2003. V. 39. P. 319–337. <https://doi.org/10.1017/S003224740300305X>
25. Hodgson D.A., Noon P.E., Vyverman W., Bryant C.L., Gore D.B., Appleby P., Gilmour M., Verleyen E., Sabbe K., Jones V.J., Ellis-Evans J.C., Wood P.B. Were the Larsemann Hills ice-free through the Last Glacial Maximum? // Antarctic Sci. 2001. V. 13. P. 440–454. <https://doi.org/10.1017/S0954102001000608>
26. Hodgson D.A., Whitehouse P.L., De Cort G., Berg S., Verleyen E., Tavernier I., Roberts S.J., Vyverman W., Sabbe K., O'Brien P. Rapid early Holocene sea-level rise in Prydz Bay, East Antarctica // Glob. Planet. Chang. 2016. V. 139. P. 128–140.
27. Ilieva R., Yaneva R., Zhiyanski M., Abakumov E. Morphological and physico-chemical properties of Cryosols in the Bulgarian antarctic base on Livingston island, Antarctica // Silva Balcanica. 2021. V. 22. P. 57–67. <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e66704>
28. IUSS Working Group WRB. 2015. 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 No. 106. FAO, Rome.
29. Kaup E., Burgess J.S. Surface and subsurface flows of nutrients in natural and human impacted lake catchments on Broknnes, Larsemann Hills, Antarctica // Antarctic Sci. 2002. V. 14(4). P. 343–352. <https://doi.org/10.1017/S0954102002000123>
30. Kiernan K., Gore D., Fink D., White D., McConnell A., Sigurdsson I. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica // Antarctic Sci. 2009. V. 21. P. 373–382. <https://doi.org/10.1017/S0954102009002028>
31. Kurt S., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica // Australian J. Earth Sciences. 1989. V. 36. P. 219–241.
32. Łachacz A., Kalisz B., Giełwanowska I., Olech M., Chwedorzewska K.J., Kellmann-Sopyła W. Nutrient abundance and variability from soils in the coast of King

- George Island // *J. Soil Sci. Plant Nutrition*. 2018. V. 18. P. 294–311.
<https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005001101>
33. *Lopes D.V., Souza J.J.L.L., Simas F.N.B., Oliveira F.S., Schaefer C.E.G.R.* Hydrogeochemistry and chemical weathering in a periglacial environment of Maritime Antarctica // *Catena*. 2021. V. 197. P. 104959.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104959>
34. *Mergelov N., Dolgikh A., Shorkunov I., Zazovskaya E., Soina V., Yakushev A., Fedorov-Davydov D., Pryakhin S., Dobryansky A.* Hypolithic communities shape soils and organic matter reservoirs in the ice-free landscapes of East Antarctica // *Scientific Rep.* 2020. V. 10. P. 10277.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-67248-3>
35. *Nuruzzama M., Rahaman W., Mohan R.* Sources, distribution and biogeochemical cycling of dissolved trace elements in the coastal lakes of Larsemann Hills, East Antarctica // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 764. P. 142833.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142833>
36. *Ravindra R., Mahesh B.S., Mohan R.* Geomorphological insight of some ice-free areas of Eastern Antarctica // *Glaciers and the Polar Environment*. IntechOpen, 2020.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.94445>
37. *Rudnic R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // *Treatise on geochemistry*. 2003. V. 3. Elsevier-Pergamon, Oxford, London. P. 1–64.
38. *Salts in Antarctic Soils* / Eds. I.B. Campbell, G.G.C. Claridge. *Developments in Soil Science*, Elsevier. V. 16. 1987. P. 239–273.
[https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70157-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70157-0)
39. *Sedov S., Zazovskaya E., Fedorov-Davydov D., Alekseeva T.* Soils of East Antarctic oasis: Interplay of organisms and mineral components at microscale // *Bol. Soc. Geol. Mex.* 2019. V. 71. P. 43–63.
<https://doi.org/10.18268/BSGM2019v71n1a4>
40. *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. V. 160. P. 41–49.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.001>
41. *Siqueira R.G., Lopes D.V., De Souza J.J.L.L., Schaefer C.E.G.R., Souza C.D., De Oliveira F.S., Filho E.I.F.* Acid sulfate soils from Antarctica: genesis and properties along a climatic gradient // *An Acad Bras Cienc.* 2022. V. 94. P. e20210625.
<https://doi.org/10.1590/0001-3765202120210625>
42. *Smykla J., Drewnik M., Szarek-Gwiazda E., Siang Hii Y., Knap W., Emslie S.D.* Variation in the characteristics and development of soils at Edmonson Point due to abiotic and biotic factors, northern Victoria Land, Antarctica // *Catena*. 2015. V. 132. P. 56–67.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.011>
43. *Toner J.D., Sletten R.S., Prentice M.L.* Soluble salt accumulations in Taylor Valley, Antarctica: Implications for paleolakes and Ross Sea Ice Sheet dynamics // *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2013. V. 118. P. 198–215.
<https://doi.org/10.1029/2012JF002467>
44. *Ugolini F.C., Bockheim J.G.* Antarctic soils and soil formation in a changing environment: A review // *Geoderma*. 2008. V. 144. P. 1–8. www.sciencedirect.com.
45. *Vlček V., Pospíšilová L., Uhlík P.* Mineralogy and chemical composition of crysols and andosols in Antarctica // *Soil Water Res.* 2018. V. 13. P. 61–73.
<https://doi.org/10.17221/231/2016-SWR>
46. *Wang Y.G., Zhao J.* Element Distribution at Stornes Peninsula, Larsemann Hills, East Antarctica // *Jidi Yanjiu*. 1997. V. 9. P. 283–288.

Soils of the Broknes Peninsula, East Antarctica

T. I. Kukharchyk¹*, S. V. Kakareka¹, and J. G. Giginyak²

¹*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220076 Belarus*

²*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, 220072 Belarus*

*e-mail: tkukharchyk@gmail.com

The results of a study of permafrost soils (Crysols) in the eastern part of the Broknes Peninsula, Larsemann Hills, East Antarctica are presented. Field studies were carried out in four key areas characterizing wet and dry locations within two valleys, an elevated dry area with visual signs of salinization, and an area with a moss ecosystem in January-February 2020 according to the program of the 12th BAE. Data on the granulometric and chemical composition of soils, acidity, content of organic carbon, total nitrogen, mobile nutrients, exchangeable bases, and water-soluble compounds are discussed. The variability of the main indicators of soils in key areas is shown. The Si₂O₃/R₂O₃ ratio varies from 2.9 (for the slopes of the valleys) to 5.2 (for the saline area). The highest content of C_{org} (2.62%), N_{tot} (0.42%) and P₂O₅ (117.8 mg/kg) are characteristic of the soils of the moss ecosystem, as well as waterlogged habitats of wet valleys (1.84%, 0.20% and 108.2 mg/kg, respectively). In the saline area, an increased content of K₂O (217.3 mg/kg) and a high proportion of exchangeable sodium (up to 37–44%) were revealed. Different contributions of soil-forming factors are characterized with the dominance of lithogenic (plot I), biogenic (plot II), geomorphological (valley slopes in plot III), hydrological and biogenic (valley bottoms in plots III and IV). The data obtained on the geochemical properties of soils can be used as the basis for subsequent assessments of their functioning depending on climate change and anthropogenic loads, as well as supplementing the database on soils in Antarctica.

Keywords: Crysols, soil-forming factors, nutrients, exchangeable bases