

УДК. 631.48 (99-15)

ПРИМИТИВНЫЕ ПОЧВЫ ГОРЫ DEMARIA (GRAHAM LAND, ANTARCTIC PENINSULA): MORFOLOGIYA, MINERAL'NYI SOSTAV, VERTIKAL'NOE RASPREDELЕНИЕ

А.Д. Рошаль¹, А.П. Краснопорова¹, И.В. Дикий², Г.Д. Юхно¹, З.А. Сизова¹,
Д.В. Шмырев³, Ю.Г. Гамуля⁴, А.Ю. Утевский³

¹ НИИ химии при Харьковском национальном университете имени В.Н. Каразина,
61022, Харьков, Украина, alexandre.d.rochal@univer.kharkov.ua

² Кафедра зоологии, Львовский национальный университет имени Ивана Франко,
ул. Грушевского, 4, 79005, г. Львов, Украина, i.dykuu@gmail.com

³ Кафедра зоологии и экологии животных, Харьковский национальный университет имени
В.Н. Каразина, 61022 г. Харьков, Украина, autevsk@yandex.ua

⁴ Кафедра ботаники и экологии растений, Харьковский национальный университет имени
В.Н. Каразина, 61022 г. Харьков, Украина, ygamulya@mail.ru

Исследование посвящено примитивным почвогрунтам Западной Антарктики (Graham Land, Antarctic Peninsula). Известно, что Антарктика утратила свои почвы в результате оледенения, современные процессы почвообразования здесь начались заново в значительно более неблагоприятных условиях низких температур и при низкой скорости биологических процессов. Именно такие условия почвообразования были обнаружены на горе Demaria в районе научных интересов Украинской антарктической станции Академик Вернадский.

Впервые была заложена катена на горе Демария (Mount Demaria S 65°17', W 64°06') в диапазоне высот от 0 до 500 м над уровнем моря. Для сбора образцов в лакунах микро- и нанорельефа вдоль линии миграции органических и минеральных продуктов выбрано 9 контрольных точек. Каждая точка была привязана к системе координат с использованием GPS. Проведен химический анализ макроэлементов в пробах. Были определены содержание влаги, количество золы после сжигания образца, содержание макроэлементов Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, а также P и N. Сделан анализ зависимости содержания каждого элемента от высоты отбора пробы, рассчитаны параметры миграции макроэлементов. Показано, что влажность и содержание Na⁺, Ca²⁺ и N линейно увеличиваются с понижением высоты, концентрации K⁺, Cl⁻ демонстрируют две разных линейных зависимости – соответственно высоте отбора проб (по-видимому, биогенная и абиогенная составляющие). В случае Mg²⁺ и P зависимости содержания этих элементов от высоты обнаружено не было.

Общая направленность процессов миграции элементов приводит к формированию элювиальных и элювиально-делювиальных почв в зависимости от рельефа.

Примітивні ґрунти гори Demaria (Graham Land, Antarctic Peninsula): морфологія, мінеральний склад, вертикальний розподіл.

Рошаль О.Д., Краснопорова А.П., Дикий І.В., Юхно Г.Д., Сизова З.А., Шмиров Д.В., Гамуля Ю.Г., Утевський А.Ю.

Реферат. Дослідження присвячено примітивним ґрунтам Західної Антарктики (Graham Land, Antarctic Peninsula). Відомо, що Антарктика втратила свої ґрунти внаслідок зледеніння. Сучасні процеси ґрунтоутворення розпочалися за значно несприятливіших умов низьких температур та низької швидкості біологічних процесів. Саме такі умови ґрунтоутворення було виявлено на горі Demaria у районі наукових інтересів Української антарктичної станції Академік Вернадський.

Уперше було закладено катену на горі Demaria (Mount Demaria S 65°17', W 64°06') в інтервалі висот від 0 до 500 м над рівнем моря. Для збирання зразків у лакунах мікро- та нанорельєфа вздовж лінії міграції органічних і мінеральних продуктів було визначено 9 контрольних пунктів. Кожний пункт

було прив'язано до системи координат з використанням GPS. Зроблено хімічний аналіз макроелементів у пробах. Визначено вміст вологи, кількість золи після спалювання зразка, вміст макроелементів Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , а також P і N. Проаналізовано вміст кожного елемента в залежності від висоти відбору зразка, розраховано параметри міграції макроелементів. Встановлено, що вологість ґрунтів і вміст Na^+ , Ca^{2+} та N лінійно зростають зі зменшенням висоти, K^+ , Cl^- демонструють дві різні лінійні залежності – відповідно до висоти відбору зразків (ймовірні біогенна і абіогенна складові). У випадку Mg^{2+} і P залежності вмісту цих елементів від висоти не було встановлено.

Загальна спрямованість процесів міграції елементів спричиняє формування елювіальних та елювіально-делювіальних ґрунтів залежно від рельєфу.

Primitive soils of the Mount Demaria (Graham Land, Antarctic Peninsula): morphology, mineral composition, vertical distribution.

A.D. Roshal, A.P. Krasnopiorova, I.V. Dykyu, Z.A. Sizova, G.D. Yukhno, D.V. Shmyrov, Yu.G. Gamulya, A.Yu. Utevsky

Abstract. The research is devoted to primitive soils of West Antarctica (Graham Land, Antarctic Peninsula). It is known that Antarctica lost its soil as a result of the glaciation, and the modern soil-forming processes restarted in much more "unfavourable" conditions of low temperatures and low speed of biological processes. Such conditions of soil formation have been found on the mount Demaria (S 65°17', W 64°06') in the area of scientific interests of Ukrainian Antarctic station Academician Vernadsky.

The catena on the Mount Demaria was formed in the range of altitudes from 0 to 500 m above sea level. Nine check samples were collected in lacunae of micro- and macro relief along migration way of organic and mineral components. Coordinates of sampling places were specified with GPS. The samples were analyzed for moisture content and for the amount of ash after combustion test. The concentrations of macro elements – Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , as well as P and N in all the probes were determined. The regression analysis of concentration of each element relatively altitude a.s.l. was carried out; parameters of element migration were estimated. It was found that moisture levels and concentrations of Na^+ , Ca^{2+} and N linearly depend on altitude value. K^+ , Cl^- demonstrate two linear dependencies at different altitude ranges (probably due to biogenic and non-biogenic migration). In the case of P and Mg^{2+} , no dependences were found.

The general tendency of the element migration leads to the formation of eluvial and eluvial-deluvial soil, depending on the terrain.

Key words: Antarctic, Mount Demaria, soils, macroelements, microelements.

1. Введение

Антарктика является регионом приоритетных исследований в области биологии, экологии и почвоведения. В комплексе исследований, осуществляемых Национальным антарктическим научным центром Украины совместно со специалистами Харьковского и Львовского национальных университетов в рамках Государственной целевой научно-технической программы проведения исследований в Антарктике на 2011–2020 годы, природные суходольные и морские экотопы прибрежной полосы и глубоководного шельфа Антарктических островов занимают значительное место.

Среди приоритетных научных направлений по изучению наземных экосистем в мировой науке все большее внимание уделяется исследованию процессов почвообразования (Абакумов и др., 2011/2012; Глазовская, 1958; Горячкин и др., 2012; Лупачев и др., 2013; Лысак и др., 2012; Мергелов и др., 2012; Bockheim at al., 1997; Bockheim, 2006; Megan R. Balks at al., 2013). Такой интерес не случаен, поскольку почва является не только важным компонентом, но и результатом всего комплекса процессов, протекающих в экосистеме. Таким образом, мы изучаем почву как результат глобальных биогеохимических процессов, протекавших на поверхности нашей планеты не один миллион лет.

Классическое почвоведение рассматривает почвообразовательные процессы в масштабах мега-, макро- и мезорельефов и по преимуществу изучает хорошо сформировавшиеся почвы, имеющие развитый профиль. Классификация этих почв достаточно разработана, равно как их описание, морфология и генезис. Также достаточно полно описаны биологические и химические процессы, протекающие в них.

В ряду малоизученных почв наименее исследованы почвы труднодоступных районов Земли, среди которых особый интерес представляют почвы Антарктики. Именно эти примитивные почвы позволяют сформировать понимание основных процессов первичного почвообразования, не прибегая к абстрактному моделированию. Это возможно благодаря уникальным природно-климатическим особенностям региона и составу флоры и фауны. Именно здесь можно узнать, с чего начинались процессы почвообразования на нашей планете.

Еще одной особенностью Антарктики является то, что она утратила свои почвы в результате оледенения, и процессы почвообразования здесь начались заново в значительно более неблагоприятных условиях низких температур и низкой скорости биологических процессов. Эти особенности Антарктики и позволили нам в настоящее время изучать процессы, протекавшие в других регионах миллионы лет назад.

Почвам Антарктики посвящено достаточно много публикаций, начиная с 1950-х годов большая их часть связана с Южными Шетландскими островами в районе Антарктического полуострова (South Shetland Is. – Antarctic Peninsula Region) (Corte & Somoza, 1954, Holdgate et al., 1967; Allen & Heal, 1970, Everett, 1976) и Сухими долинами Мак-Мёрдо в районе моря Росса (McMurdo Dry Valleys – Ross Sea Region) (McCraw, 1967).

Указанные районы характеризуются ландшафтами, способствующими почвообразованию в рамках мезорельефов. Поэтому здесь мы также не наблюдаем начальных этапов почвообразования. Нам представляется важным рассмотрение процессов почвообразования в условиях микро- и нанорельефов горных формаций. Именно здесь, ввиду экстремальности условий, возможно наблюдение начальных процессов почвообразования, которые протекают очень медленно.

Важным аспектом почвообразования является взаимодействие минерального субстрата и биомассы. Исследование данного вопроса позволяет объяснить взаимосвязь между разнообразием биоценозов и химическим составом среды, а также изменение этой среды под влиянием биологических процессов. Изучение таких взаимосвязей в различных климатических зонах Земли позволяет сформировать общие представления о биогеохимических циклах на планете.

Общеизвестным является факт, что геофизические процессы, протекающие на поверхности литосферы, в гидросфере и атмосфере приводят к миграции химических элементов. Поскольку для большинства химических элементов Земля может считаться замкнутой системой, поддержание относительного постоянства химического состава происходит за счет установления в микромасштабах межфазных и внутрифазных равновесий, а в масштабах планеты, её значительных территорий, акваторий, отдельных ландшафтов – путём образования и функционирования геохимических циклов. Значительное влияние на миграцию некоторых химических элементов оказывают биологические процессы, включающиеся в существующие циклы. Разработка принципов функционирования и последующее исследование сложных биогеохимических циклов описаны в работах крупнейших геоэкологов и почвоведов (Вернадский, 1965; Ковда, 1976).

Внутренней частью биогеохимических циклов является массоперенос – изменение концентрации органических и неорганических веществ, в состав которых входят атомы так наз. микро- и макроэлементов. Соотношение различных элементов создает условия для развития (или, наоборот, подавления) различных групп микроорганизмов, формирующих органический и неорганический субстрат для развития организмов более высокой организации. В свою очередь, функционирование биоценоза приводит к изменению состава субстрата.

В представленной нами работе приведены результаты предварительных исследований химического состава и структуры отложений, собранных на сухопутном ландшафтном полигоне – горе Demaria (S 65°17', W 64°06', Graham Land, Antarctic Peninsula) в сезон 17-й Украинской антарктической экспедиции 5.02.2012 г. (рис. 1, 2, 9, 14 см. на цв. вклейке между 268 и 269 стр.).

2. Материалы и методы

2.1. Общая характеристика профиля

Профиль расположен по северо-западному склону горы Demaria с уклоном 45 градусов. Высота над уровнем моря составляет 635 метров (2080 футов). Вершина горы поднимается на юго-восток от мыса Туксен (Cape Tuxen). Юго-западный склон горы – почти вертикальный (80–85 град.) скальный обрыв над океаном. Северо-западный склон горы Демария простирается от мыса Туксен (Cape Tuxen) и покрыт обширными моховыми полями почти до высоты 485 м. Северный и северо-восточный склоны (55–60 град.) покрыты снегом и льдом. В летний период по северному кулуару до самого океана сходят снежные лавины.

Отбор проб осуществлялся на маршруте, проходящем по относительно пологому, покрытому моховыми полями северо-западному склону горы Демария (рис. 1).

Описание маршрута. От кромки берега до 3-5 метров в зоне прибоя – в основном голые скалы, куда попадает соленая вода, с редкими вкраплениями лишайников или водорослей. До высоты 25 м со стороны колонии пингвинов большая часть моховых подушек погибла под толстым слоем птичьего гуано. От 25 м до 300 м над уровнем моря размещена основная масса моховых полей *Polytrichum piliferum* с куртинами щучки антарктической *Deschampsia antarctica* и лишайниками. По пути подъема на маршруте отбора проб на расстоянии от 100 до 200 метров отмечены скальные поднятия (жандармы) высотой до 5–10 м, которые разделяют относительно пологие моховые поля. Мох на вертикальных участках скал держится слабо и, намочнув, большими фрагментами подушек сползает вниз по склону. С северной стороны склона горы, начиная с высоты 200 до 480 м, к самой кромке берега примыкают пять больших скальных оврагов. С юго-западной стороны – один.

На высоте от 300 до 480 метров регистрируются только отдельные фрагменты мха, а доминируют разные виды лишайников, среди которых преобладает *Usnea antarctica*.

Для исследования склона была заложена катена приблизительно на одной прямой между точками 47 м и 408 м над уровнем моря, на которой было выбрано 9 типовых пунктов для сбора образцов, с привязкой каждого пункта полигона к системе координат с использованием GPS. Для исследования были взяты 9 проб, а также дополнительная (далее – «контрольная») проба 5/2-10 (табл. 1) на высоте 255 м, представляющая собой образец растительного покрова (живые и мертвые растения целиком с корневой системой) и не содержащая минеральных компонентов. Результаты, полученные для данной контрольной пробы, позволили приблизительно оценить вклад органических компонентов в показатели элементного анализа других проб.

Таблица 1

Локализация образцов, собранных на горе Demaria

Высота над уровнем моря, м*	Пункт отбора пробы	Координаты
47	MD1	S 65°16'07,5" W 64°07'17,7"
109	MD2	S 65°16'10,4" W 64°07'07,0"
134	MD10	S 65°16'12,5" W 64°07'10,1"
162	MD9	S 65°16'13,9" W 64°07'06,0"
166	MD3	S 65°16'13,1" W 64°07'01,2"
255	MD5	S 65°16'20,1" W 64°06'59,5"
304	MD6	S 65°16'22,8" W 64°06'59,0"
351	MD7	S 65°16'24,5" W 64°06'53,1"
408	MD8	S 65°16'31,0" W 64°06'42,3"
255	MD5/2	S 65°16'20,1" W 64°06'59,5"

Пробы были отобраны в лакунах микро- и нанорельефа вдоль линии миграции органических и минеральных продуктов. Далее полученные пробы замораживали при -18°C , транспортировали и сохраняли при указанной температуре до проведения анализов. После размораживания проб были проведены их каталогизация, макро- и микрофотосъемка, химический анализ, идентификация растительных и животных остатков.

2.2. Характеристика пунктов сбора и почвенных образцов

1. Высота 47 м над уровнем моря (MD1, рис. 2.1) (рис. 2.1–2.9 см. на цв. вклейке). Напочвенный покров представлен отдельными куртинами щучки антарктической (*Deschampsia antarctica* E.Desv.) и хорошо развитым покровом из куртин мхов (*Polytrichum piliferum* Hedvig) на более ровных террасах и лишайниками (*Usnea antarctica* Du Rietz., *Umbilicaria antarctica* Frey & IM Lamb, *Cladonia chlorophaea* (Flörke ex Sommerf.) Spreng.) на более крутых элементах микрорельефа. Дернина довольно хорошо развита, переходит в почвенный слой, состоящий из полуразложившихся растительных остатков и мелкодисперсных частиц материнской породы, мощностью до 40 мм. Цвет почвы черный, с мелкими светлыми вкраплениями минеральных частиц. Почва неструктурна, рыхлая, рассыпчатая, отдельные частицы минеральной основы склеены остатками полуразложившихся растительных остатков и гумусом.

2. Высота 109 м над уровнем моря (MD2, рис. 2.2). Терраса над расщелиной с юго-западной экспозицией. Напочвенный покров представлен отдельными куртинами щучки антарктической (*Deschampsia antarctica*), плотной куртиной мхов (*Polytrichum piliferum*, *Polytrichum alpinum* (Hedw.) G.L.Sm), листоватыми и кустистыми лишайниками (*Usnea Antarctica*, *Umbilicaria antarctica*). На поверхности почвы имеются зеленые пленочки водорослей. Злаки (*Deschampsia antarctica*) образуют небольшие дернины мощностью около 45 мм, состоящие из переплетения корней и стеблей, отмерших органических остатков, отдельных мелкозернистых обломков горных пород. Ниже располагается почво-грунт. Под моховыми подушками также расположен дерниноподобный горизонт, состоящий из нижних частей стеблей мхов и полуразложившихся растительных остатков (преимущественно листьев и стебли мхов). Толщина этого слоя около 29 мм. Следующий горизонт толщиной 74,5 мм образован полуразложившимися растительными остатками и мелкодисперсными частицами материнской породы (мелкие частицы горных пород размером менее 0,01 мм).

3. Высота 134 м над уровнем моря (MD10, рис. 2.3). Напочвенный покров представлен небольшими куртинами злаков (*Deschampsia antarctica*), хорошо развитыми куртинами мхов (*Polytrichum piliferum*, *Polytrichum alpinum*), кустистыми и накипными лишайниками (*Usnea antarctica*, *Umbilicaria antarctica*, *Lecidea* sp.).

В образце почво-грунта напочвенная растительность отсутствует. Почва черного цвета, основа минеральной части – мелкодисперсный гравий с немногочисленными неправильно-призматической формы обломками материнских пород (камешки до 42,8 мм длиной и 19,6 мм шириной). Мелкозернистая фракция представлена частицами неправильной формы размером от 0,25 до 0,65 мм. Отдельные частицы скреплены органическими остатками бурого цвета в довольно рыхлую массу. Форма частиц неправильная, призматическая, кубовидная, плитчатая.

4. Высота 162 м над уровнем моря (MD9, рис. 2.4). Обширная терраса с большими куртинами мхов (*Polytrichum piliferum*, *Polytrichum alpinum*). Напочвенный покров представлен небольшими одиночными куртинами злаков (*Deschampsia antarctica*). Между куртинами мха визуально просматриваются открытые участки, которые раньше служили лунками для гнезд поморников.

Образец темно-бурого (почти темно-коричневого) цвета. Структура отсутствует, почвенные горизонты не дифференцированы. При высыхании твердый. Основная масса состоит из полуразложившихся растительных органических остатков (фрагменты листьев и стеблей мхов и, вероятно, злаков), включения минеральных частиц редки.

5. Высота 166 м над уровнем моря (MD3, рис. 2.5). Терраса над оврагом расщелиной с северо-восточной экспозицией. Напочвенный покров представлен небольшими куртинами злаков (*Deschampsia antarctica*), хорошо развитыми куртинами мхов (*Polytrichum piliferum*, *Polytrichum alpinum*), кустистыми и накипными лишайниками (*Usnea antarctica*, *Umbilicaria antarctica*, *Lecidea* sp.). Дернина *Deschampsia antarctica* имеет вегетативную часть около 50 мм высотой, собственно дернина – около 20 мм, ниже расположены корни на глубину до 22,4 мм. Следующий горизонт представлен отдельными корнями злаков, полуразложившимися органическими остатками, мелкими минеральными частицами. Нижняя часть с признаками отмирания плавно переходит в черно-буроватого цвета почво-грунт.

6. Высота 255 м над уровнем моря (MD5, рис. 2.6). Напочвенный покров образуют кустистые и накипные лишайники (*Usnea antarctica*, *Cladonia chlorophaea*, *Lecidea* sp.) и мхи (*Polytrichum alpinum*, *Pohlia nutans*). Мох развит довольно хорошо, образует плотную куртину. В скоплениях лишайников накапливается мелкая крошка, которая, вероятно, и становится минеральной основой почво-грунтов. Высота олиственной вегетирующей части растений мха составляет 2,5-3 см, ниже расположен горизонт безлистных стеблей и полуразложившихся органических остатков, преимущественно листьев мхов, перемешанных с мелкозернистыми минеральными включениями. Цвет горизонта черный, местами со слабым бурым оттенком. Дернина из мхов переходит в нижней части в бурокоричневую слабо дифференцированную почву, состоящую из большого количества органических остатков и фрагментов слаборазложившихся листьев и стеблей мхов. Крупная крошка в составе почвы не обнаружена, крупный гравий встречается единично. Основа минеральной части – мелкие осколки скальных пород, не превышающие размера 0,01 мм.

7. Высота 304 м над уровнем моря (MD6, рис. 2.7). Напочвенный покров образован куртинами мелких мхов (*Pohlia nutans* Lindberg, *Sanionia georgico-uncinata* (Müll. Hal.) Ochyra & Hedenäs, *Syntrichia princeps* Mitten) и кустистыми и листовыми лишайниками (*Usnea antarctica*, *Umbilicaria antarctica*). Цвет почвы черный, со слегка бурым оттенком и мелкими беловатыми вкраплениями. Почва слабо дифференцирована на почвенные горизонты, не структурирована, основа – крупно- и мелкозернистая крошка материнской породы. В почвенном слое встречаются отдельные камни неправильной призматической структуры 12,5–26,8 мм длиной и 12,5–6,6 мм шириной. Средняя фракция крошки немногочисленна, представлена одиночными камешками диаметром от 3,3 до 5,2 мм. Мелкая фракция крошки довольно многочисленна и имеет размер около до 2,2 мм, неправильную угловатую призматическую, кубовидную или округлую форму. Основу почвенного скелета составляет мелкая фракция размером 0,5–1,5 мм.

8. Высота 351 м над уровнем моря (MD7, рис. 2.8). Небольшая терраса перед скальными жандармами. Напочвенный покров представлен лишайниками (*Usnea antarctica*, *Cladonia chlorophaea*, *Lecidea* sp.) и мелкими мхами (*Pohlia nutans*, *Polytrichum piliferum*, *Syntrichia princeps*). Высота напочвенного покрова не превышает 25–30 мм. Почвенный слой тонкий, вероятно, основой формирования стали кустистые и листоватые лишайники, которые задерживают минеральные частицы и органические остатки. Почвенный профиль не дифференцирован, структура отсутствует, мелкозернистые минеральные частицы беспорядочно перемешаны с растительными остатками. Цвет почво-грунта – черный со слабым буроватым оттенком.

9. Высота 408 м над уровнем моря (MD8, рис. 2.9). Терраса на склоне 45 град. Хорошо обдуваемая ветрами. Аналогично напочвенный покров представлен лишайниками (*Usnea antarctica*, *Cladonia chlorophaea*, *Lecidea* sp.) и мелкими мхами (*Pohlia nutans*, *Polytrichum piliferum*, *Syntrichia princeps*), которые размещены в основном в щелях между камнями. Высота напочвенного покрова не превышает 25 мм.

Почва черного со слабым бурым оттенком цвета, не структурирована, генетические горизонты не выражены, сформирована на основе наносов отложений крошки материнской породы (разнозернистых обломков горных пород). Структура глыбистая, основа почвенного скелета – крошка различного размера. Форма призматическая, неправильная, конусовидная,

плитчатая. Крупные камни размером до 27,6 мм, средняя фракция состоит из крошки призматической, кубовидной неправильной формы нескольких размеров (от 3,0 до 4,7 мм – более крупная фракция и 0,6–0,9 мм – более мелкая). Почва рыхлая, рассыпчатая, хорошо водопроницаемая. На поверхности неплотная куртина мелких мхов, кустистые и листовые лишайники.

2.3. Методы химического анализа

Для проведения химических исследований образцы почв размораживали, гомогенизировали, не разделяя их минеральные (пыль, мелкие агрегаты) и биологические (фрагменты растений, продукты жизнедеятельности птиц и млекопитающих, гумус) остатки. В полученных пробах гравиметрическим методом определяли содержание влаги, путем сжигания – количество золы, пламенно-абсорбционным анализом оценивали содержание макроэлементов Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} (ГОСТ 26427-85). Общее содержание фосфора и азота, как неорганического, так и органического происхождения, определяли соответственно молибденовым методом (ДСТУ ISO11263-2001) и методом Кьельдаля (ГОСТ 26107-84). Определение концентрации хлора проводили согласно ГОСТ 26425-85. Анализы проводили с использованием атомно-абсорбционного спектрометра С-115 ПКС и спектрофотометра Hitachi U3210. Все анализы были сделаны в трех повторностях, коэффициент вариации полученных значений не превышал 3%. Регрессионный анализ проводили при помощи программы Statistica 6.0. При этом некоторые результаты были оценены программой как достоверно выпадающие из зависимостей и в расчетах скоростей миграции, взаимных корреляций между содержаниями элементов и других параметров регрессии не учитывались.

Результаты анализов (табл. 2) перечисленных выше элементов с указанием географических координат и высот над уровнем моря для мест, где проводился отбор образцов, задепонированы в базе данных Национального антарктического научного центра Украины.

Таблица 2.

Результаты химического анализа макроэлементов*

высота над уровнем моря	влажность	кол-во золы	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	СГ	«общий» Р	«общий» N
м	%	%	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г
47	89,27	7,7	1,25	0,64	13,3	7,3	8,8	0,37	0,41
109	83,49	3,4	0,77	0,53	14,2	<,1	16,4	0,13	0,25
134	61,16	8,6	0,35	0,36	11,6	01,8	4,8	0,26	0,29
162	86,58	15,6	0,15	0,21	03,2	2,8	2,9	0,21	0,19
166	73,44	35,8	0,49	0,51	10,1	3,3	3,9	0,81	0,13
255	77,69	60,5	0,15	0,31	07,4	<0,1	2,3	0,61	0,07
304	26,74	64,3	0,28	0,32	14,8	6,9	3,4	0,22	0,02
351	69,79	60,5	0,49	0,28	6,7	5,2	5,4	0,46	0,31
408	51,04	74,4	0,06	0,14	1,9	<0,1	2,2	0,25	0,05
255**	58,55	14,5	0,61	0,26	11,2	2,3	4,1	0,16	0,22

* коэффициент вариации для всех приведенных значений не более 3%

** контрольная проба на высоте 255 м над уровнем моря.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Общие характеристики образцов

Одним из важных факторов, влияющих на формирование изучаемых почв, является водный режим. Пресные воды, образовавшиеся при таянии снега и льда, вызывают промывание почвы и миграцию солей, вымывая их из слабосформированных почвенных гори-

зонтов. Вода является важным двигателем геохимических циклов, поскольку массоперенос и соответственно миграция химических элементов осуществляются в основном при перемещении водных потоков. Вода – один из основных компонентов, необходимых для функционирования как отдельных организмов, так и биоценозов в целом. Поэтому одним из важных химических показателей образцов является содержание в них влаги.

Поскольку пробы сохранялись в замороженном состоянии, содержание в них влаги практически не отличалось от того, которое было на момент отбора. Зависимость влажности образцов от высоты над уровнем моря, где производился отбор, приведена на рис. 3.

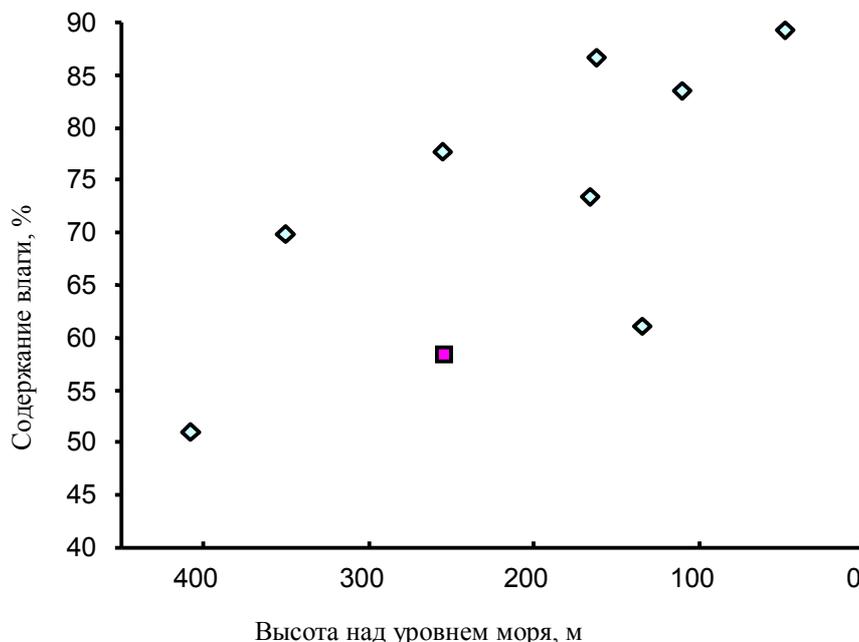


Рис. 3. Зависимость влажности проб от высоты отбора (квадратом помечена контрольная точка).

Минимальная влажность проб (на максимальной высоте) составляет приблизительно 40%, увеличиваясь по мере понижения высоты ландшафта до ~ 90%. Таким образом, содержание воды во всех пробах является достаточным и для функционирования компонентов биоценозов, и для миграции химических элементов, как минимум, с использованием диффузионного механизма.

Другим важным параметром является масса золы, полученной после сжигания (озоления) проб. Чем меньше конечная масса золы, тем больше образец содержит органических компонентов и карбонатов. Поскольку пробы отбирали и обрабатывали *tale quale*, содержание золы косвенно указывает на соотношение минеральной и биогенной частей в образце.

Для проб, отобранных на высотах выше 200 м, характерны высокая зольность и, следовательно, значительная степень минерализации (рис. 4). На высотах ниже 160–170 м содержание золы колеблется от 3 до 15%, что говорит о преимущественно органическом составе пробы.

Наглядными являются различия результатов влажности и зольности у двух проб, отобранных на высоте 255 м. Одна из проб была получена согласно обычным правилам отбора образцов, вторая, контрольная, как было описано выше, представляла собой образец, почти целиком состоящий из растительной массы, т.е. включающий преимущественно органические компоненты. Зольность второй пробы составляла 14,5% (против 60,5% у обычной пробы), влажность – 58,6% (против 77,7% у обычного частично минерализованного образца).

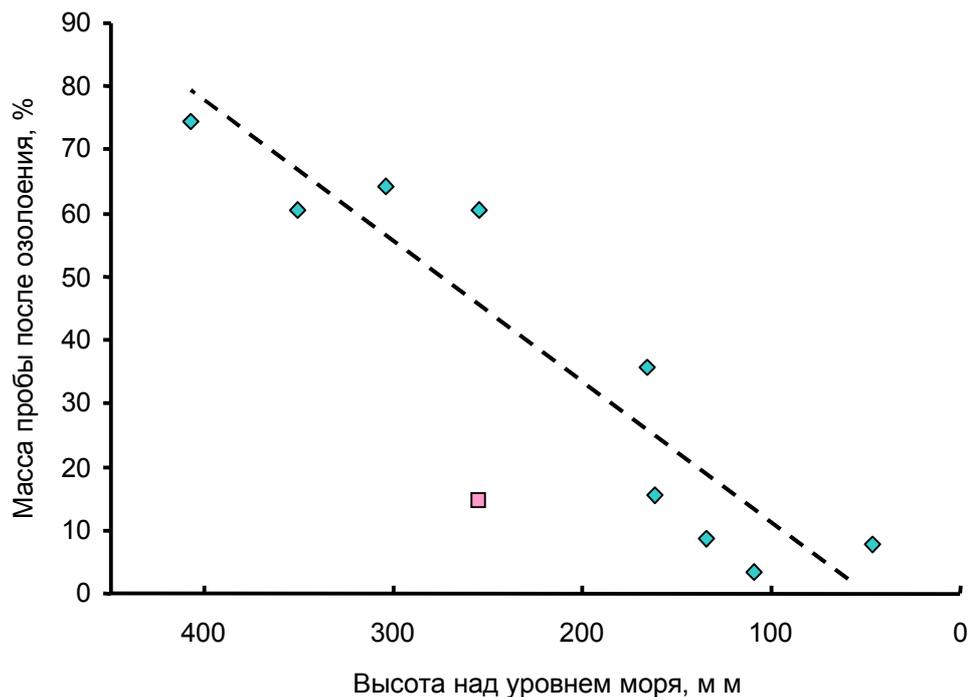


Рис. 4. Зависимость степени озонирования проб от высоты отбора (квадратом помечена контрольная точка).

3.2. Химический состав металлических макроэлементов

Содержание Na^+ увеличивается с понижением высоты (рис. 5). Полученная зависимость является линейной, с высоким коэффициентом корреляции ($r = 0.909$), описывается уравнением

$$C_{\text{Na}} = 0,064 - 0,119 \times 10^{-3} \times H, \quad (1)$$

где C_{Na} – концентрация ионов натрия в образце (мг/г), а H – высота над уровнем моря в точке отбора образца (м). Содержание ионов натрия сравнительно невелико и, согласно уравнению (1), достигает в нижних слоях ландшафта всего лишь ~ 65 мкг/г. Поскольку на больших высотах над уровнем моря влияние биогенных факторов на динамику миграции ионов натрия представляется незначительным, можно предположить, что данный элемент имеет абиогенное происхождение, т.е. попадает на ледники в составе минеральной пыли. Миграция последней при таянии ледников объясняет увеличение содержания натрия с понижением высоты. Линейный характер полученной зависимости показывает, что и на низких высотах влияние биологических циклов на содержание натрия по-прежнему остается минимальным.

Аналогичный характер распределения в зависимости от высоты характерен и для Ca^{2+} . Содержание ионов Ca^{2+} в пробах значительно выше, чем ионов Na^+ , и превышает содержание последних примерно в 24,9 раза. Однако в остальном зависимость концентрации Ca^{2+} от высоты отбора проб подобна таковой для Na^+ (рис. 6).

Представленная зависимость также имеет линейный характер ($r = 0.913$), что указывает на преимущественно абиогенный характер миграции ионов кальция на поверхности ландшафта. Из полученного уравнения также следует, что скорость миграции кальция на

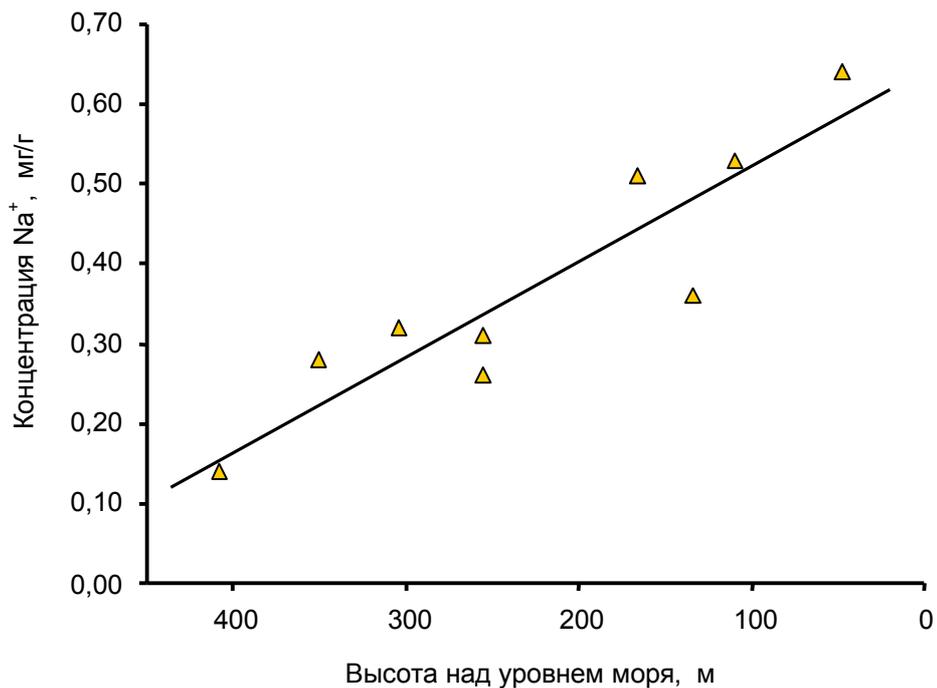


Рис. 5. Зависимость содержания Na⁺ от высоты отбора проб.

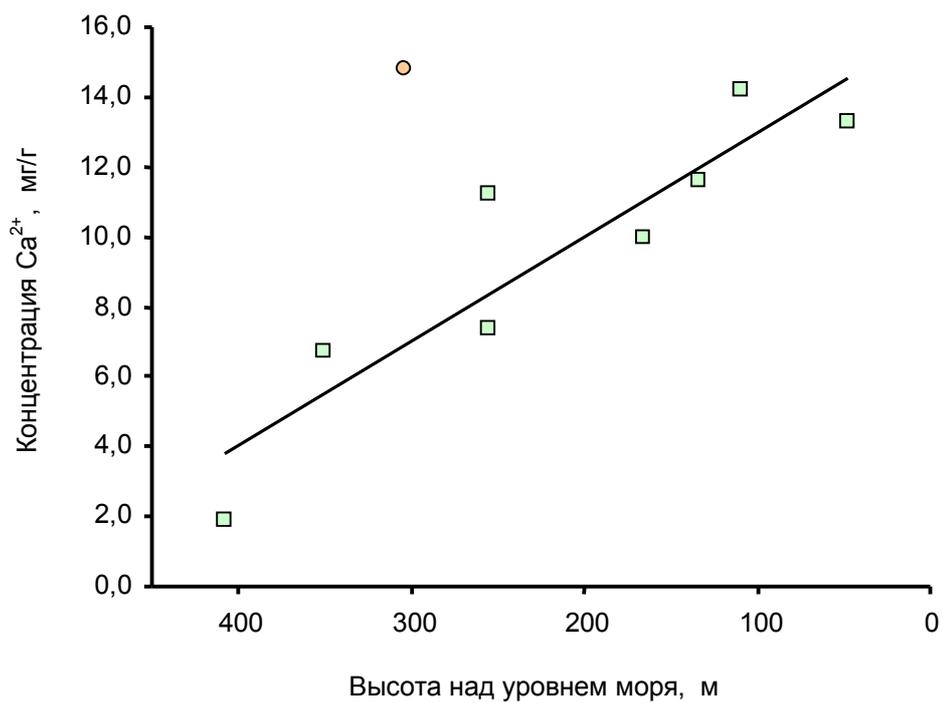


Рис. 6. Зависимость содержания Ca²⁺ от высоты отбора проб (окружностью помечена контрольная точка)

$$C_{Ca} = 1,595 - 2,976 \times 10^{-3} \times H \quad (2)$$

поверхности ландшафта почти в 25 раз больше скорости миграции ионов натрия. Впрочем, частично увеличение концентрации кальция может быть связано не с миграцией ионов, а с накоплением продуктов жизнедеятельности фауны Аргентинских островов.

В отличие от ионов предыдущих элементов, содержание Mg^{2+} не зависит от высоты отбора проб (рис. 7). Концентрация магния в пробах с максимальным содержанием этого элемента практически вдвое ниже, чем концентрация Ca^{2+} . Ряд проб содержит очень малые количества Mg^{2+} (в пределах границы чувствительности метода определения). Содержание магния зависит от количества в образцах минеральных компонентов и, следовательно, имеет абиогенное происхождение.

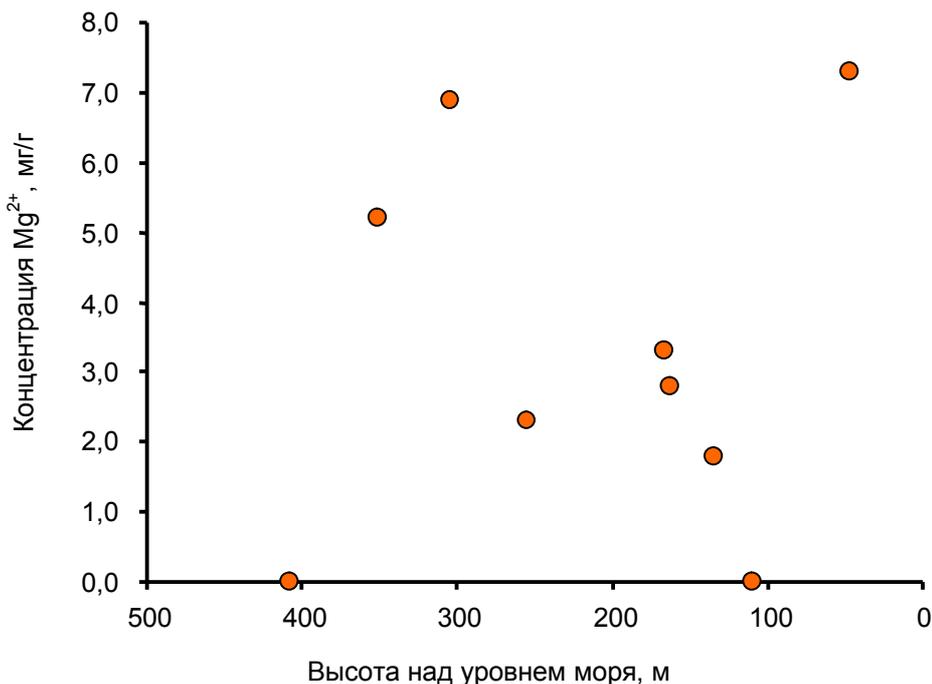


Рис. 7. Зависимость содержания Mg^{2+} от высоты отбора проб.

Зависимость концентрации K^+ от высоты над уровнем моря носит сложный характер и представляет собой сумму двух линейных отрезков. Первая зависимость наблюдается в интервале высот от 408 до 166 м, для неё характерен медленный прирост концентрации иона K^+ по мере снижения. Ионы калия на данном отрезке, очевидно, имеют абиогенное происхождение, а их миграция обусловлена перемещением в растворенном состоянии с талой водой и механическим перемещением минеральных частиц. Вторая зависимость в интервале высот от 255 до 47 м (рис. 8) характеризуется быстрым накоплением ионов K^+ с уменьшением высоты.

Скорость изменения концентрации K^+ в четыре раза превышает таковую на верхних участках. Ускорение процесса миграции ионов может быть обусловлено как определенными геохимическими процессами, так и влиянием биогенных факторов. В пользу последнего предположения говорит тот факт, что контрольная проба, представляющая собой растительный образец (высота – 250 м), содержит концентрацию калия такую же, как и образцы, взятые на более низких участках ландшафта (высота – 100–150 м).

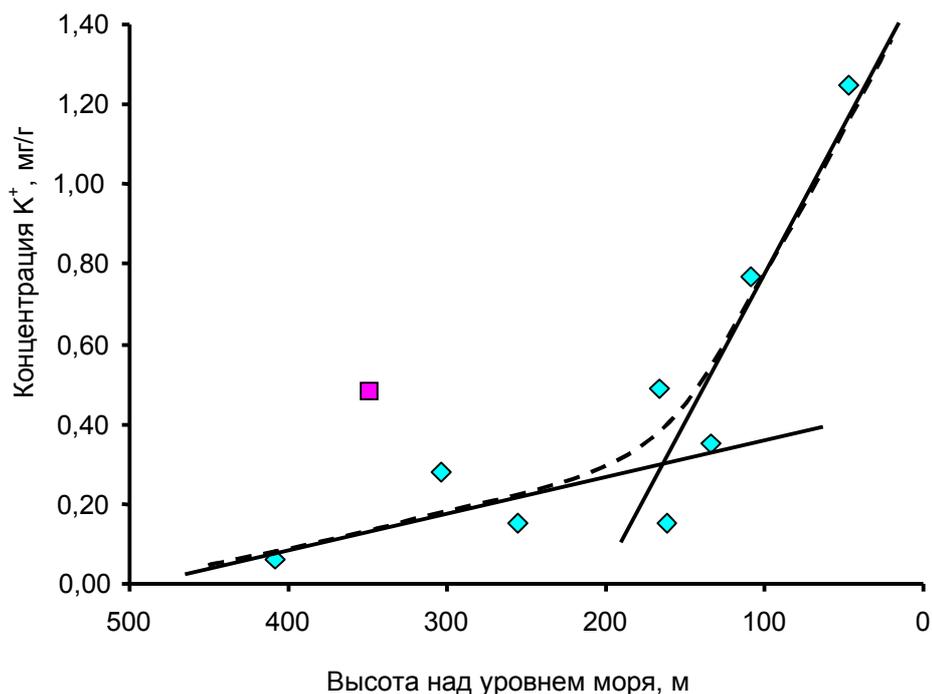


Рис. 8. Зависимость содержания K^+ от высоты отбора проб (квадратом помечена контрольная точка).

Градиенты концентраций, отражающие миграцию ионов Na^+ , K^+ и Ca^{2+} , приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры миграции макроэлементов в пределах исследованного ландшафта

Элемент	Пределы высот над уровнем моря, м	Градиент концентраций (скорость миграции элементов), $мг/г \times м (\times 10^3)$	Содержание элементов на высотах, $мг/г (\times 10^2)$		Коэффициенты корреляции для зависимостей $C_{эл.} = f(H)$
			0 м	500 м	
Na^+	400 – 50	0,119	6,4	0,5	0,908
Ca^{2+}	400 – 50	2,976	159,5	10,7	0,913
K^+	400 – 150	0,158	–	0,3	0,857
	200 – 50	0,812	16,1	–	0,925
Cl	400 – 150	0,723	–	13,3	0,730
	200 – 50	4,660	111,2	–	0,980
N	200 – 50	2,167	83,4	–	0,913

Как уже было отмечено, наибольшей скоростью миграции обладают ионы кальция. Скорости миграций щелочных металлов, натрия и калия, на больших высотах примерно одинаковы, поэтому можно предположить, что эти ионы имеют одинаковый источник – возможно, присутствуют в одних и тех же минералах. На ионы щелочноземельных металлов в пробах приходится большая часть – от 91 до 94%, в то время как суммарное содержание Na^+ и K^+ составляет от 9 до 6%, несколько уменьшаясь с увеличением высоты (рис. 9, см. на цв. вклейке между 268 и 269 стр.).

3.3. Химический состав неметаллических макроэлементов

Среди неметаллических элементов наибольший интерес представляет хлор, как правило, находящийся в природных объектах в виде хлорид-аниона (Cl^-). Хлориды упомянутых выше макроэлементов хорошо растворимы в воде, таким образом, содержание хлорид-аниона существенно влияет на скорость миграции ионов металлов и соответственно на скорость обращения геохимических циклов данных элементов.

Зависимость концентрации хлорид-анионов от высоты также может быть представлена в виде двух прямолинейных отрезков, пересекающихся в точке, которая соответствует высотам 150–200 м над уровнем моря. Как и в случае ионов K^+ , рост концентрации Cl^- с понижением высоты происходит существенно медленнее на отрезке 200–450 м (рис. 10). В интервале высот меньше 150 м наблюдается более чем шестикратное увеличение градиента содержания хлорид-иона с изменением высоты.

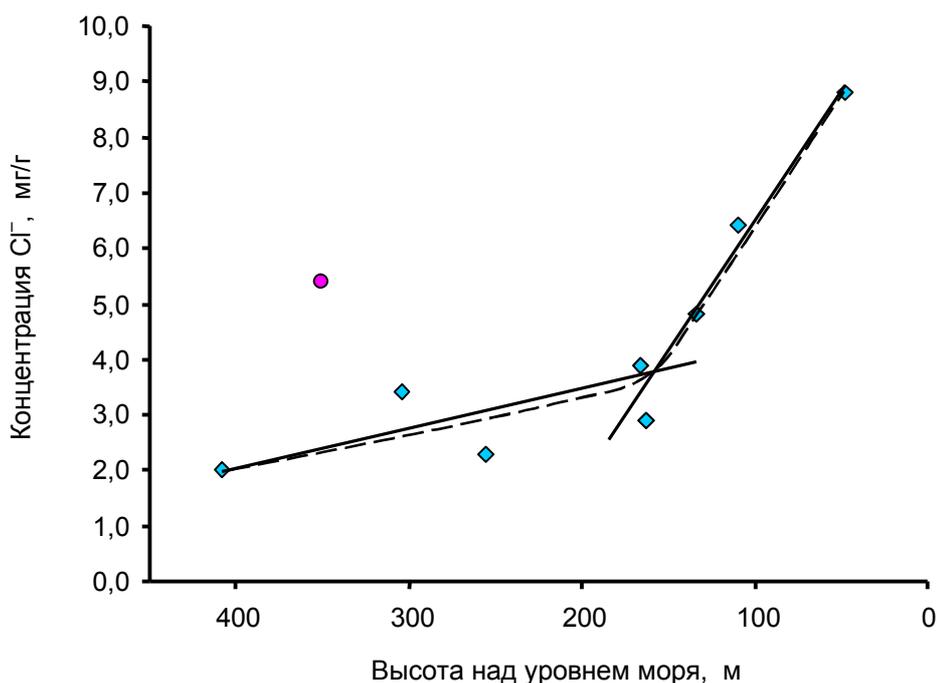


Рис. 10. Зависимость содержания Cl^- от высоты отбора проб (окружностью помечена контрольная точка).

Расчет молярных соотношений катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} и хлорид-аниона на высотах 0 и 500 м над уровнем моря дает соответственно значения 0,09/0,06; 0,13/0,03 и 2,87/1,43. Это означает, что хлор находится в избыточном количестве по отношению к натрию и калию, и последние могут присутствовать в образцах и мигрировать в виде соответствующих хлоридов. С другой стороны, для связывания всего кальция в растворимую соль концентрация хлорид-иона в образцах должна быть в полтора-три раза выше. Итак, можно заключить, что кальций накапливается и мигрирует также в виде других солей, например, плохо растворимых фосфатов, карбонатов или комплексов с гуминовыми кислотами. Механизм миграции таких солей должен отличаться от механизма миграции хлоридов. Если хлориды могут переноситься вместе с талой водой в растворенном виде, то фосфаты, карбонаты и гуматы могут мигрировать лишь путем механического переноса частиц.

Данные выводы подтверждаются исследованиями корреляций между содержанием в пробах хлорид-аниона и катионов металлов. Так, зависимость между концентрациями K^+ и

СГ имеет линейный характер с высоким коэффициентом корреляции ($R = 0.973$), что говорит о совместном переносе данных ионов в локальном геохимическом цикле. Зависимость между концентрациями Na^+ и СГ также может быть описана линейным уравнением с меньшим коэффициентом корреляции – $R = 0.861$. В то же время корреляция между содержанием в пробах Mg^{2+} и СГ, а также Ca^{2+} и СГ полностью отсутствует.

Содержание фосфора примерно одинаково в большинстве проб и колеблется в пределах 0,01-0,03% (рис. 11).

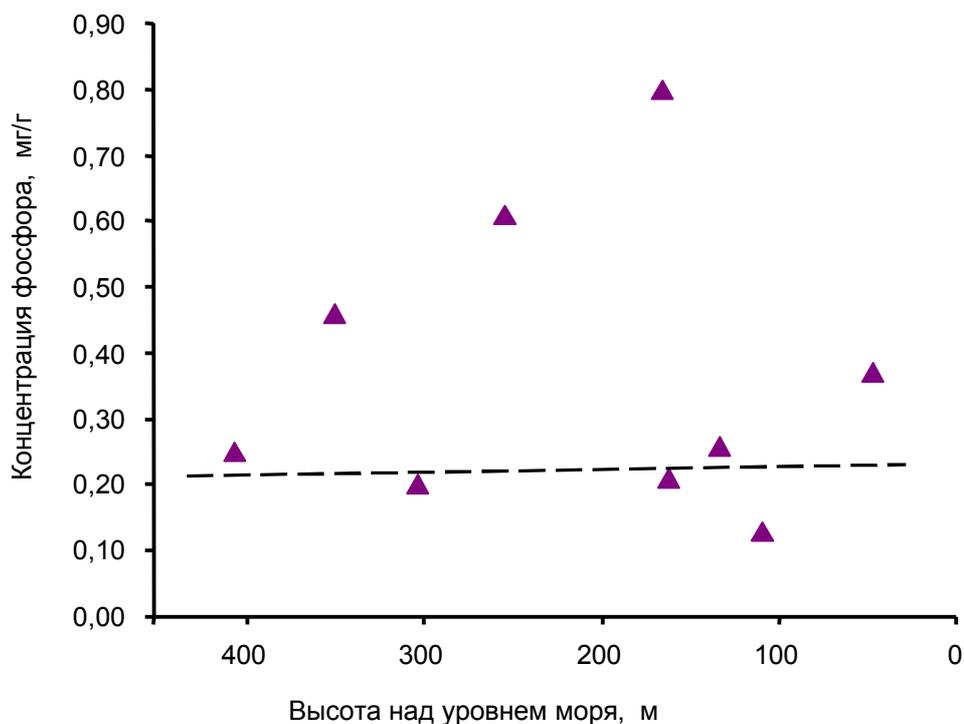


Рис. 11. Зависимость содержания Р от высоты отбора проб.

Это свидетельствует о низкой скорости миграции данного элемента и о его минеральном происхождении (например, при образовании минеральной пыли из базальтов, содержащих в своем составе фосфор). Пробы с высоким содержанием фосфора на высотах 150 и 250 м над уровнем моря могут содержать фосфаты биогенного происхождения – осколки яичной скорлупы, фрагменты скелетов животных и т.д.

На высотах 300–400 м над уровнем моря содержание азота в пробах низкое – 0,2–0,5 мг/г. Однако при уменьшении высоты от 250–200 м до 45 м концентрация азота линейно увеличивается приблизительно в 10 раз (рис. 12).

Рост концентрации азота не коррелирует с содержанием ни в одном из изученных нами элементов. Тем не менее заметно, что рост содержания азота связан с понижением зольности образцов, т.е. с увеличением в них доли органических компонентов (рис. 13).

Таким образом, можно заключить, что азот имеет преимущественно биогенное происхождение и образует отдельный биогеохимический цикл.

Возрастающее влияние биогенного фактора хорошо заметно на диаграммах распределения неметаллов (рис. 9б) – доля „общего” азота в смеси макроэлементов-неметаллов при понижении высоты отбора проб увеличивается от 18% до 31%.

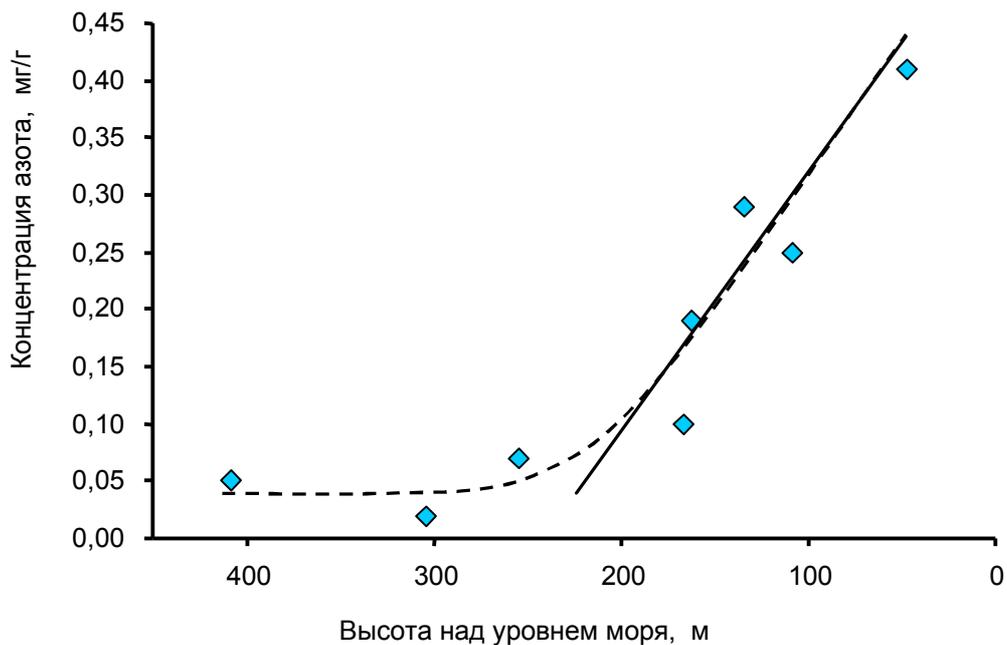


Рис. 12. Зависимость содержания N от высоты отбора проб.

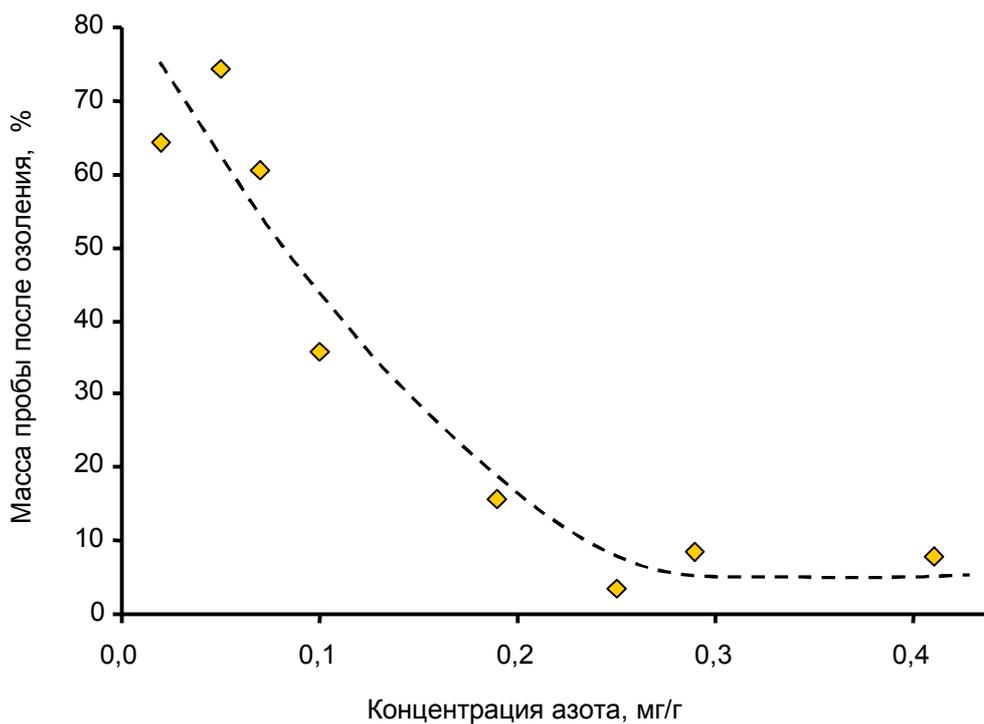


Рис. 13. Корреляция между содержанием N и степенью озонения проб.

4. Заключение

Проведенные исследования представляют цикл работ по изучению особенностей формирования почв в условиях антарктических биогеохимических циклов. Полученные нами результаты могут стать эталоном для сравнения процессов на горном ландшафте материка (Mount Demaria) и островных ландшафтах Аргентинских островов (Argentine Is.). В дальнейшем представляется необходимым заложить катены на Аргентинских островах, на которых находится Украинская антарктическая станция Академик Вернадский.

Сравнение полученных данных о содержании макроэлементов с имеющимися данными о флоре и фауне на вышеупомянутом ландшафте может быть использовано для установления взаимосвязей между особенностями функционирования геохимических и биогеохимических циклов элементов и структурой связанных с ними биоценозов Антарктики.

Основу минерального скелета почво-грунтов составляют твердые минеральные породы, образовавшиеся преимущественно в результате процессов вымораживания (трещинообразования) и морозного выветривания. В результате этих явлений образуются почвы, представленные преимущественно грубоскелетным элювием коренных пород. Также одной из особенностей изучаемых почв является значительное участие в формировании почв не только минеральных частиц, но и остатков растительности. Общая направленность процессов миграции приводит к формированию элювиальных и элювиально-делювиальных почв в зависимости от рельефа. Суммируя полученные данные, можно сказать, что элементы мигрируют с разной скоростью – высокой, как ионы Ca^{2+} , либо низкой, как в случае фосфора. У большинства ионов металлов (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) влияние биогенных факторов на их миграцию представляется минимальным. В то же время биогенные факторы оказывают частичное влияние на миграцию ионов калия и в значительной степени влияют на перемещение азотсодержащих соединений.

Для проведения дальнейших исследований в русле задач, поставленных Государственной целевой научно-технической программой проведения исследований в Антарктике на 2012–2020 годы, представляется необходимым организовать на Аргентинских островах, в районе расположения Украинской антарктической станции Академик Вернадский, работы по изучению почвенных катен на планируемых профилях. В первую очередь представляют интерес катены следующих участков (рис. 14, см. цв. вклейку).

1. Galindez Is., восточный склон Woozle Hill – мыс Penguin Point (вертикальная катена, характеризующаяся выносом талых вод, микро- и макроэлементов с ледника, смывом орнитогенного и териогенного органического материала, а также растительного происхождения, в низинах и переходом последнего в морскую среду в период активного таяния ледника и снежного покрова).

2. Galindez Is., северо-восточный склон Woozle Hill – ледниковое озеро под скалодромом – северная бухта Penguin Point (вертикальная катена, характеризующаяся выносом талых вод, микро- и макроэлементов с ледника, смывом и накоплением орнитогенного и растительного органического материала в ледниковое озеро и выносом его с мощным водным потоком в период активного таяния ледника и снежного покрова и переходом в морскую среду).

3. Galindez Is., северный склон Woozle Hill – пологая терраса возле конструкции для измерения концентрации родона с оврагом на берегу Meek Channel (наполовину вертикальная и горизонтальная катена, характеризующаяся выносом талых вод, микро- и макроэлементов с ледника, смывом орнитогенного и растительного органического материала и переходом его в морскую среду в период активного таяния ледника и снежного покрова).

4. Berge Galindez Is. от мыса с магнитной обсерваторией вдоль пролива Meek Channel до мыса Penguin Point (горизонтальная катена на пересеченной местности с оврагами, характеризующаяся присутствием органического материала растительного происхождения и активно накапливающимся, в результате жизнедеятельности новой колонии пингвинов, органическим орнитогенным материалом).

5. Берег Galindez Is., мыс Marina Point – перешеек возле магнитной обсерватории (горизонтальная катена с пологим уклоном, характеризующаяся развитым растительным покровом с добавлением орнитогенного материала в результате жизнедеятельности новой колонии пингвинов).

6. Острова Three Little Pigs Is. (горизонтальная катена со слабо развитым растительным покровом, орнитогенным материалом – результатом жизнедеятельности *Larus dominicanus* Lichtenstein, 1823, и *Catharacta skua* Brünnich, 1764, с сильным заплеском солеными водами).

Авторы выражают благодарность зимовщикам 16-й Украинской антарктической экспедиции под руководством Е.В. Карягина за помощь в организации восхождения на Mount Demaria и сборе материала, а также Национальному антарктическому научному центру Украины за поддержку проекта (проект № Н/6-2013, № госрегистрации 0113U005817).

Литература

Абакумов Е.В., Лупачев А.В. Почвенное разнообразие наземных экосистем Антарктики (в районах расположения российских антарктических станций). «Український антарктичний журнал», № 10-11 (2011/2012), с. 222–228.

Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. - М., 1965. - 374 с.

Глазовская М.А. Выветривание и первичное почвообразование в Антарктиде // Научные доклады Высшей школы, Геолого-Географические науки. – 1958. – № 1. – С. 63–76.

Горячкин С.В., Гиличинский Д.А., Мергелов Н.С., Конюшков Д.Е., Лупачев А.В., Абрамов А.А., Зазовская Э.П. Почвы Антарктиды: первые итоги, проблемы и перспективы исследований // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М.А. Глазовской). М., 2012. – С. 361–388.

ГОСТ 26107-84 Почвы. Методы определения общего азота.

ГОСТ 26425-85 Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке.

ГОСТ 26427-85 Почвы. Метод определения натрия и калия в водной вытяжке.

ГОСТ 26428-85 Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке.

ДСТУ ISO11263-2001 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук фосфору.

Ковда В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком // Биогеохимические циклы в биосфере. – М.: Наука, 1976. – С. 19–87.

Лупачев А.В., Абакумов Е.В. Почвы Земли Мэри Бэрд (Западная Антарктика). – Почвоведение, 2013, № 10, с. 1167–1180.

Лысак Л.В., Лапыгина Е.В. Бактериальные комплексы в почвах влажных долин оазиса Ларсеманн (Восточная Антарктида). // Альманах современной науки и образования. – Тамбов: Грамота, 2012. № 9 (64). С. 195–200.

Мергелов Н.С., Горячкин С.В., Шоркунов И.Г., Зазовская Э.П., Черкинский А.Е. Эндолитное почвообразование и скальный «загар» на массивно-кристаллических породах в Восточной Антарктике. // Почвоведение, 2012, № 10, с. 1027–1044.

Bockheim J.G., Balks M.R., McLeod M. ANTPAS Guide for Describing, Sampling, Analyzing, and Classifying Soils of the Antarctic Region // ANTPAS soil description manual – version 1 July 2006.

Bockheim, J.G. Properties and classification of cold desert soils from Antarctica. Soil Sci. Soc. Am. J. 1997. 61:224–231.

Megan R. Balks, Jeronimo Lopez-Martinez, S.V. Goryachkin, N.S. Mergelov, Carlos E. G. R. Schaefer, Felipe N. B. Simas, Peter C. Almond, Graeme G. C. Claridge, Malcolm Mcleod and Joshua Searrow // Windows on Antarctic soil-landscape relationships: comparison across selected regions of Antarctica. – Geological Society, London, Special Publications, first published. – May 16, 2013; doi 10.1144/SP381.9.