

УДК 631.484:574.43

**ИНИЦИАЛЬНОЕ ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ В ПРИБРЕЖНОЙ АНТАРКТИКЕ: СУЩЕСТВУЮТ ЛИ НЕ ОРНИТОГЕННЫЕ ПОЧВЫ?****Н. В. Заименко<sup>1</sup>, Т. Ю. Бедерничек<sup>1</sup>, В. В. Швартау<sup>2</sup>, Л. Н. Михальская<sup>2</sup>, П. Б. Хоецкий<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Национальный ботанический сад им. Н. Н. Гришко НАН Украины, г. Киев, E-mail: zaimenkov@ukr.net, bedernichek@nas.gov.ua*

<sup>2</sup> *Институт физиологии растений и генетики НАН Украины, г. Киев, E-mail: victorschwartau@gmail.com, mykhalskaya\_l@ukr.net*

<sup>3</sup> *Национальный лесотехнический университет Украины, г. Львов, E-mail: hpb@ua.fm*

**Реферат.** Примитивные тундровые почвы сформировались и функционируют в суровых климатических условиях. Их изучение позволяет количественно оценить инициальные стадии почвообразования, что крайне важно как для понимания процесса в целом, так и для создания искусственных почв островов Галиндез и Скуа (архипелаг Вильгельма). В условиях Прибрежной Антарктики наблюдается мощный биогенный (орнитогенный) поток вещества по схеме: планктон + микробентос → *N. concinna* → *L. dominicanus* → гуано + погадки (раковины *N. concinna*), что оказывает существенное влияние на условия формирования примитивных почв. Обоснована индикаторная роль цезия и кадмия для определения следов орнитогенного процесса в почвах: высокое содержание этих химических элементов в почве, даже в случае отсутствия в профиле видимых остатков раковин моллюсков, может свидетельствовать об их орнитогенном происхождении. Содержание кальция, цезия и кадмия в почвах островов Галиндез и Скуа, сформированных на раковинах *N. concinna*, значительно выше, чем в материнских породах. В почвах, сформированных на риолитах и их измененных разновидностях, содержание Sr и Cd было значительно ниже, чем в материнских породах. Однако, в них также сохранилась сильная линейная зависимость содержания этих химических элементов в почве от содержания в ней кальция, что может свидетельствовать о проявлениях орнитогенного почвообразовательного процесса.

**Ініціальне ґрунтоутворення в Прибережній Антарктиці: чи існують неорнітогенні ґрунти?****Н. В. Заїменко, Т. Ю. Бедернічек, В. В. Швартау, Л. М. Михальська, П. Б. Хоецький**

**Реферат.** Примітивні тундрові ґрунти сформувались і функціонують у суворих кліматичних умовах. Їхнє вивчення дозволяє кількісно оцінити ініціальні стадії ґрунтоутворення, що вкрай важливо як для розуміння процесу в цілому, так і для створення штучних ґрунтів в майбутньому. Розглянуто доцільність використання з цією метою примітивних ґрунтів островів Галіндез і Скуа (архипелаг Вільгельма). В умовах Прибережньої Антарктики спостерігається потужний біогенний (орнітогенний) потік речовини за схемою: планктон + микробентос → *N. concinna* → *L. dominicanus* → гуано + погадки (мушлі *N. concinna*), що чинить істотний вплив на умови формування примітивних ґрунтів. Обґрунтована індикаторна роль цезію та кадмію для визначення слідів орнітогенного процесу у ґрунтах: високий вміст цих хімічних елементів у ґрунті, навіть у разі відсутності в профілі наявних

слідів мушель моллюсків, може свідчити про його орнітогенне походження. Вміст кальцію, цезію і кадмію в ґрунтах островів Галіндез і Скуа, сформованих на мушлях *N. concinna*, значно вищий, ніж у материнських породах. У ґрунтах, сформованих на ріолітах, міст Ca, Sr і Cd був значно нижчим, ніж в материнських породах. Проте, у них також збереглася сильна лінійна залежність вмісту цих мікроелементів в ґрунті від вмісту кальцію в ньому, що може свідчити про прояви орнітогенного процесу ґрунтоутворення.

### **Initial soil formation in coastal Antarctica: do non-ornithogenic soils exist?**

N. Zaimenko, T. Bedernichek, V. Schwartau, L. Mykhalska, P. Khojetskyy

**Abstract.** Tundra soils were formed in a cold environment with harsh winters and short growing season. Most of them are primitive in terms of their profile differentiation and depth. Therefore, studying these soils is important for understanding the initial stages of pedogenesis. Many studies in this field have been carried out in arctic and alpine environments, but there is still some lack of information about Antarctic soils. However, primitive soils of Antarctic tundra and other cold environments may be incomparable because of their different genesis. Impact of ornithogenic products on tundra soils and habitats in Southern Hemisphere is much stronger than in Arctic or alpine environments; but many soils in the coastal Antarctica have no visible signs of ornithogenic influence. In this study we hypothesized that the high content of trace elements in soils may prove their ornithogenic origin. It may be caused by an intensive biogenic flux of chemical elements from marine to terrestrial ecosystems: plankton + microbenthos → *N. concinna* → *L. dominicanus* → guano + pellets (*N. concinna* shells). In this study we investigated the content of trace elements in soils of Galindez Island and Skua Island (Wilhelm Archipelago). It was found that the content of Ca, Sr and Cd in soils formed on *N. concinna* shells (ornithogenic soils) was significantly higher than in parent rock. Contents of Sr and Cd in soil have strongly correlated with content of Ca, which is the main component of mollusk shells. In some soils formed on rhyolites, the content of these elements in soil was much lower than in parent rock; but linear correlation between Ca and Sr ( $R^2=0.997$ ,  $p\leq 0.001$ ) as well as between Ca and Cd ( $R^2=0.963$ ,  $p\leq 0.001$ ) contents was as strong as in soils formed on *N. concinna* shells. These results support the idea of ornithogenic origin of Ca, Sr and Cd in the Antarctic soils. A further study with a focus on the isotopic composition of these elements is therefore suggested.

**Key words:** tundra, cold environments, primitive soils, permafrost, ornithogenic

## **1. Вступление**

На протяжении последнего десятилетия процессы первичного (инициального) почвообразования оказались в фокусе исследований многих ученых – от почвоведов и экологов до геохимиков, ботаников и физиологов растений. По мнению А. И. Морозова (2007), этот шаг является очень своевременным, и без понимания сути процессов превращения неживой материи в биокосное тело – почву – не может быть и речи ни о фундаментальности почвоведения как науки, ни о будущих достижениях в направлении создания искусственных почв.

В этом контексте особое место занимают тундровые, или криогенные, экосистемы. В силу компактности размеров и простоты трофических связей их первыми стали изучать в микрокосмных условиях (фитотронах); на сегодняшний день о них накопилось достаточно много информации (Карелин, Замолодчиков, 2008). Однако классические исследования тундровых экосистем в большинстве своем проводились в Арктике и частично в альпийском высокогорье. В значительно меньшей степени исследованы экосистемы и почвы антарктической тундры, которая существенно отличается от других криогенных экосистем, прежде всего сильным влиянием орнитофауны на процессы почвообразования (Абакумов, 2010).

Термин «орнитопочвы» или «орнитосоли» используется преимущественно для характеристики почвенного покрова, сформировавшегося на месте бывших колоний птиц со значительными отложениями гуано (Pereira et al., 2013). Понятие «орнитогенной почвы» значительно шире и включает все почвы, которые сформировались под воздействием орнитофауны, а их в Антарктике подавляющее большинство (Абакумов, 2014).

В недавних исследованиях И.Ю. Парникозы и др. (2014, 2015) обнаружены закономерности распространения щучки антарктической (*Deschampsia antarctica* Desv.) в местах гнездовой и кормовой активности доминиканской чайки (*Larus dominicanus* Licht.) и южнополярного поморника (*Stercorarius maccormicki* Saunders) на острове Галіндез. Авторы предполагают, что в современных многочисленных популяциях *D. antarctica* участки с максимальной плотностью этого вида соответствуют бывшим гнездам чаек, а перенос гнездового материала, в ходе которого теряются

отдельные фрагменты, является одним из основных способов распространения *D. antarctica*. Ранее (Парникоза и др., 2014) было установлено, что 41 локалитет *D. antarctica*, что составляет 58% от общего числа локалитетов, обнаруженных на острове, находится на или в непосредственной близости от мест гнездования и кормовых столиков чаек. Следовательно, и почву, сформированную под растениями *D. antarctica* в пределах таких локалитетов, также можно считать орнитогенной.

Существенное влияние орнитофауны на почвообразование в Прибрежной Антарктике посредством накопления гуано, россыпей раковин *Nacella concinna*, распространения эдификаторов и прежде всего *D. antarctica* дает основания усомниться в возможности формирования в таких условиях иных, кроме как орнитогенных, почв. Если это предположение окажется верным, целесообразность использования примитивных антарктических почв в качестве модельных объектов для изучения процессов первичного почвообразования вызывает сомнение.

Целью данного исследования было: i) обнаружить не орнитогенные почвы на островах Галиндез и Скуа; ii) обосновать индикаторную ценность кальция, стронция и кадмия для определения следов орнитогенного процесса почвообразования. Такой выбор химических элементов обусловлен тем, что кальций является основным элементом раковин моллюсков, а стронций – его аналогом. Что касается кадмия – он представлен в материнских породах в незначительных количествах, а моллюски *N. concinna* способны его эффективно накапливать.

### Материалы и методы

Образцы почвы (субстрата) отбирали в марте 2016 года (XX Украинская антарктическая экспедиция) в пятикратной повторности на островах Галиндез и Скуа, архипелаг Вильгельма (рис. 1). Места отбора образцов почвы были подобраны таким образом, чтоб максимально полно охватить почвенное разнообразие территории исследования и включали: почвы подо мхами и *D. antarctica*, сформированные на россыпях раковин *Nacella concinna*, инициальные почвы на зарастающих гнездах *Larus dominicanus*, почвы сформированные на оторфованных остатках мхов.

Образцы помещали в герметичные полиэтиленовые пакеты, охлаждали до температуры 5°C и в таком виде транспортировали в лабораторию. Там их высушивали и для проведения дальнейших исследований использовали уже воздушно-сухую почву, введя поправку на содержание гигроскопичной влаги.

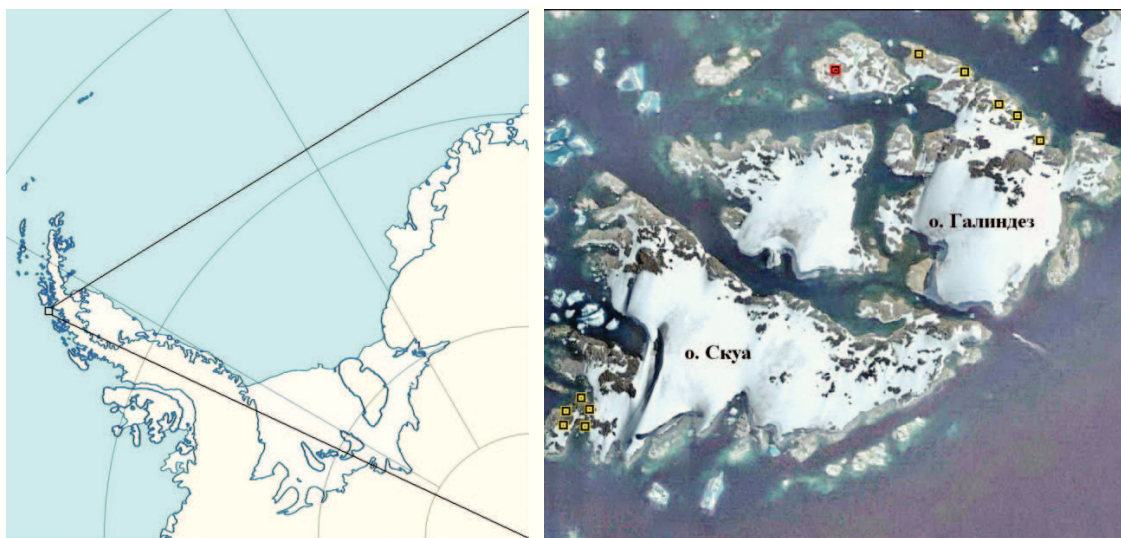


Рис. 1. Схема отбора образцов почвы (субстрата) на островах Галиндез и Скуа (желтым цветом обозначены места отбора проб, красным – станция Академик Вернадский) (Заименко и др., 2016)

Содержание кальция, кадмия и стронция в образцах примитивных почв определяли на масс-спектрометре ICP-MS Agilent 7700x (Agilent Technologies) с ICP-MS Mass Hunter Work Station. Результаты представлены в пересчете на массу абсолютно сухой почвы.

## 2. Результаты и обсуждение

В работах С. М. Недогибченко и др. (2013) и Э. Я. Жовинского и др. (2014) приведен детальный анализ распространения микроэлементов в коре выветривания коренных пород и поверхностных отложениях острова Галиндез. Высокие концентрации стронция в поверхностных отложениях авторы объяснили поступлением этого элемента из атмосферы, а кадмия – вулканической активностью и подвижностью его соединений. Такое объяснение нам показалось недостаточно убедительным, объясняющим этот феномен лишь частично.

L.S. Peck et al. (1996) установили, что моллюски *Nacella concinna*, формируя раковины, способны аккумулировать стронций, частично замещая на него кальций. Также известно, что этот вид эффективно аккумулирует тяжелые металлы и широко используется по этой причине для биомониторинга (Suda et al., 2015). Учитывая эти факты, мы предположили, что одним из существенных путей накопления стронция и кадмия в почвах островов Галиндез и Скуа может быть трофическая аккумуляция этих элементов из водной среды по схеме:

планктон + микробентос → *N. concinna* → *L. dominicanus* → гуано + погадки (раковины).

Если это предположение верно, то в местах значительного накопления раковин *Nacella concinna*, прежде всего в пределах кормовых столиков (рис. 2 А) и гнезд (рис. 2 В) доминиканской чайки концентрации кадмия и стронция должны быть значительно выше, чем в других биотопах. *N. concinna* составляет 15–27% дневного рациона доминиканской чайки, а популяция из двухсот особей способна потреблять свыше 4500 моллюсков ежедневно (Favero et al., 1997). Учитывая тот факт, что размер употребляемых в пищу моллюсков может достигать 45 мм (Suda et al., 2015), а масса погадок зачастую превышает 20–25 г, биогенный поток вещества в Прибрежной Антарктике с морских экосистем в наземные становится одним из важнейших факторов почвообразования.

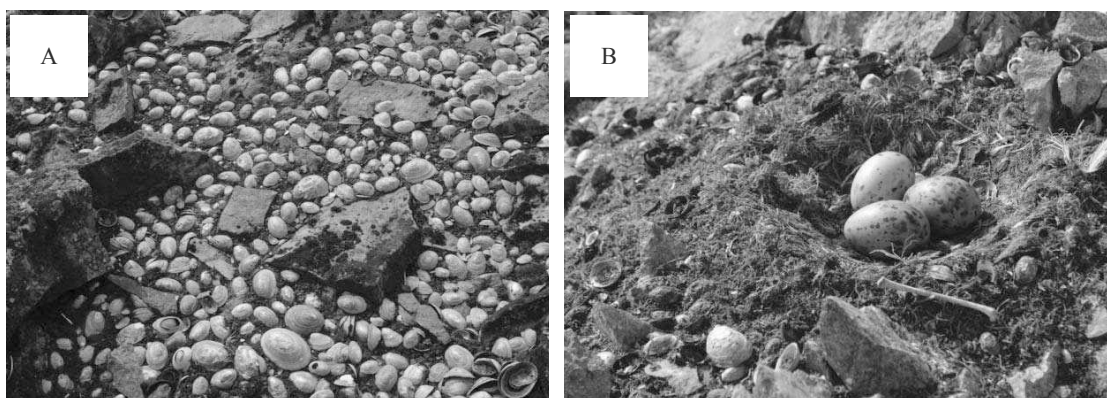


Рис. 2. Кормовой столик (А) и гнездо (В) *Larus dominicanus* (фото П. Б. Хоецкого, о. Галиндез, 2016 г.)

Среди всех исследованных нами почв самое высокое содержание стронция ( $508.36 \pm 11.79$  мг·кг<sup>-1</sup>) и кадмия ( $14.61 \pm 1.5$  мг·кг<sup>-1</sup>) было обнаружено в почве, сформировавшейся на старом гнезде доминиканской чайки. Оно было выше в несколько раз, чем в остальных вариантах, и существенно превышало максимальные возможные содержание этих элементов в материнских породах – в 1,7 раза по стронцию и 48,7 раз по кадмию (Недогибченко и др., 2013). Полученные данные дают основания предположить орнитогенный характер накопления стронция и кадмия в почвах островов Галиндез и Скуа.

Как правило, раковины моллюсков на 95–98% состоят из карбоната кальция и, следовательно, сильная зависимость содержания стронция и кадмия в почве от содержания в ней кальция может быть косвенным подтверждением проявления орнитогенного типа почвообразования. Обнаружены сильные линейные зависимости содержания стронция ( $R^2=0.997$ ,  $p \leq 0.001$ ) и кадмия ( $R^2=0.963$ ,  $p \leq 0.001$ ) от содержания кальция в почве (рис. 3). Заметим, что только в трех

вариантах из десяти почвы были непосредственно сформированы на частично разложившихся раковинах моллюсков и в одном из десяти – на оторфованных слабо разложившихся остатках бриофитов с различными фрагментами раковин. В остальных случаях – ни при отборе образцов, ни при их дальнейшем препарировании – видимых следов раковин *Nacella concinna* не было. Тем не менее, обнаруженные тренды указывают на возможную орнитогенную природу также и этих почв.

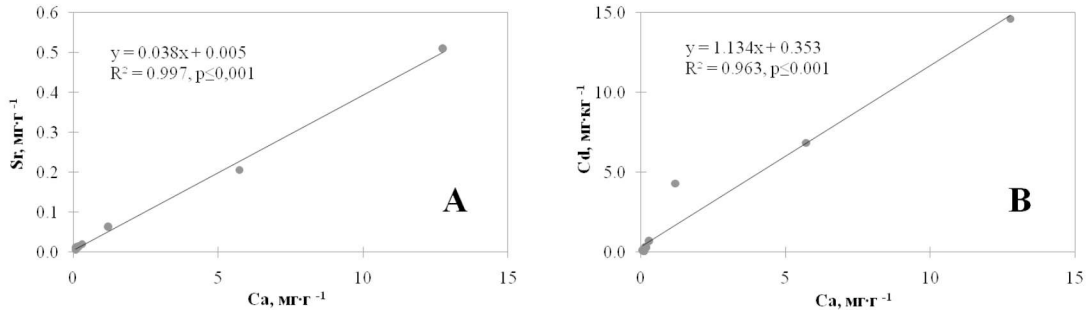


Рис. 3. Зависимость между содержанием кальция и стронция (А), а также кальция и кадмия (В) в почвах островов Галиндез и Скуа (n=10)

К интерпретации полученных в этом исследовании результатов следует подходить осторожно, учитывая косвенный характер подтверждения рабочей гипотезы. В дальнейших исследованиях следует провести оценку изотопного состава материала, из которого состоят раковины *Nacella concinna*, и сравнить его с составом соответствующих химических элементов в почвах. Это позволит прямо подтвердить или опровергнуть обнаруженные в этом исследовании закономерности.

Возвращаясь к поставленному вначале вопросу: могут ли быть в Прибрежной Антарктике не орнитогенные почвы – мы склонны ответить на него отрицательно, по крайней мере, для исследованных нами островов. Активность орнитофауны здесь столь высока, что все почвы в той или иной степени трансформированы под влиянием жизнедеятельности птиц. Тем не менее, даже в пределах соседних островов Галиндез и Скуа обнаружены существенные различия в содержании индикаторных элементов в почвах, что может свидетельствовать о меньшем воздействии орнитофауны на формирование инициальных почв острова Скуа. В будущем целесообразно степень «орнитогенности» почвы отобразить в ее названии на уровне типа или подтипа.

### 3. Выводы

1. Почвы острова Галиндез и в меньшей степени острова Скуа подвержены ощутимому воздействию орнитофауны посредством накопления гуано, россыпей раковин моллюска *Nacella concinna*, распространения эдификаторов и прежде всего *D. antarctica*.

2. В большинстве исследованных инициальных (примитивных) почв содержится много стронция и кадмия; большего всего – на почве под *D. antarctica*, сформированной на месте старого гнезда *L. dominicanus*:  $508.36 \pm 11.79$  мг·кг<sup>-1</sup> и  $14.61 \pm 0.5$  мг·кг<sup>-1</sup> соответственно.

3. Обнаружены сильные линейные зависимости содержания стронция ( $R^2=0.997$ ,  $p \leq 0.001$ ) и кадмия ( $R^2=0.963$ ,  $p \leq 0.001$ ) от содержания кальция в почве, что может свидетельствовать об орнитогенном происхождении исследованных почв даже в случае отсутствия следов раковин моллюсков.

4. В связи с ощутимым влиянием орнитофауны на почвы островов Галиндез и Скуа будет некорректным экстраполировать полученные результаты и обнаруженные закономерности на не орнитогенные тундровые почвы.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность Государственному учреждению Национальный антарктический научный центр МОН Украины за содействие в проведении исследований.

### Список литературы

1. **Абакумов Е. В.** Источники и состав гумуса некоторых почв Западной Антарктики // Почвоведение. – 2010. – № 2. – С. 538–547.
2. **Абакумов Е. В.** Зоогенный педогенез как основной биогенный почвенный процесс в Антарктиде // Русский орнитологический журнал. – 2014. – № 23 (972). – С. 576–584.
3. **Жовинский Э. Я.,** Недогибченко С. М., Крюченко Н. О. Микроэлементы в коре выветривания коренных пород оазиса острова Галиндез (Западная Антарктика) / Криосфера Земли. – 2014. – №. XVIII (3). – С. 77–81.
4. **Заименко Н. В.,** Бедерничек Т. Ю., Хоецкий П. Б. Аллелопатическая активность луговика антарктического (*Deschampsia antarctica* Desv.) в контексте глобальных изменений климата / Бюллетень Ботанического сада-института. – 2016. – № 15. – С. 26–28
5. **Карелин Д. В.,** Замолотчиков Д. Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. – М. : Наука, 2008. – 344 с.
6. **Морозов А. И.** О почве и почвоведении (взгляд со стороны). М. : ГЕОС, 2007. – 286 с.
7. **Недогибченко С. М.,** Крюченко Н. О., Жовинский Э. Я. Особенности распределения микроэлементов в поверхностных отложениях острова Галиндез (Западная Антарктика) / Украинский антарктический журнал. – 2013. – № 12. – С. 39–44.
8. **Парникоза И. Ю.,** Абакумов Е. В., Дикий И. В. и др. Орнитогенные локалитеты *Deschampsia antarctica* в районе Аргентинских островов (Прибрежная Антарктика) / Русский орнитологический журнал. – 2014. – Т. 23, Экспресс-выпуск № 1056. – С. 3095-3107.
9. **Парникоза И. Ю.,** Абакумов Е. В., Дикий И. В. и др. Влияние птиц на пространственное распределение *Deschampsia antarctica* Desv. острова Галиндез (Аргентинские острова, Прибрежная Антарктика) // Вестник Санкт-Петербургского университета серия 3: биология. – 2015. – № 1. – С. 78–97.
10. **Favero M.,** Silva P., Ferreyra G. Trophic relationships between the kelp gull and the Antarctic limpet at King George Island (South Shetland Islands, Antarctica) during the breeding season / Polar Biology. – 1997. – № 17. – P. 431–436.
11. **Peck L. S.,** Baker A. C., Conway L. Z. Strontium labeling of the shell of the Antarctic limpet *Nacella concinna* (Strebel1908). / Journal of Molluscan Studies. – 1996. – № 62. – P. 315-325.
12. **Pereira T. T.,** Schaefer C. E. G., Ker J. C. et al. Micromorphological and microchemical indicators of pedogenesis in ornithogenic cryosols (Gelisols) of Hope Bay, Antarctic Peninsula / Geoderma. – 2013. – № 193. – P. 311–322.
13. **Suda C. N.,** Vani G. S., de Oliveira M. F. et al. The biology and ecology of the Antarctic limpet *Nacella concinna* / Polar Biology. – 2015. – № 38 (12). – P. 1949–1969.