

## Почвенный покров и многолетнемёрзлые породы Антарктиды: структура и функционирование

А.В. Лупачев<sup>1</sup>, Е.В. Абакумов<sup>2</sup>, А.А. Абрамов<sup>1</sup>,  
А.С. Добрянский<sup>3</sup>, А.В. Долгих<sup>3</sup>, Э.П. Зазовская<sup>3</sup>,  
Н.С. Мергелов<sup>3</sup>, Н.И. Осокин<sup>3</sup>, И.Г. Шоркунов<sup>3</sup>, С.В. Горячкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Московская область, Пушкино, Россия;

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

## Soil cover and permafrost of Antarctica: pattern and functioning

A.V. Lupachev<sup>1</sup>, E.A. Abakumov<sup>2</sup>, A.A. Abramov<sup>1</sup>, A.S. Dobryanskiy<sup>3</sup>,  
A.V. Dolgikh<sup>3</sup>, E.P. Zazovskaya<sup>3</sup>, N.S. Mergelov<sup>3</sup>, N.I. Osokin<sup>3</sup>,  
I.G. Shorkunov<sup>3</sup>, S.V. Goryachkin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science,  
Russian Academy of Sciences, Moscow Region, Pushchino, Russia;

<sup>2</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

<sup>3</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*a.lupachev@gmail.com*

**Summary.** This paper is focused on soil cover and permafrost in Antarctica, as well as on the anthropogenic impact on the soils of the region. Micromorphological research showed that the degree of organomineral interaction in the soils of Antarctica is small. There is no active biogenic weathering of parent rocks, the formation of stable aggregates and structures, deep mineralization and humification of organic matter due to the action of limiting environmental factors. Antarctic oases have a significant “aid” to soil formation through the transfer of matter from marine and/or lake ecosystems and its redistribution in subaerial conditions through birds. The presence of a wind shadow in combination with moderate snow accumulation, which provides melt water in the summer, can create local conditions for the implementation of the most advanced forms of soil formation, increase in soil organic carbon stocks and high values of carbon dioxide emission. Analysis of our database on <sup>14</sup>C soil ages allowed us to identify the following pools of organic carbon and its proposed sources for soils and soil-like bodies of oases of East Antarctica: labile, transitional, and stable. The paper presents examples of soil cover of the main soil and climatic sections – low Antarctic tundra-barrens, mid Antarctic snow patch cryptogamic barrens and a transitional variant between cold deserts and cryptogamic barrens. The temperature monitoring network formed in 2007 on the soil surface and in the active layer consists of five boreholes and more than a dozen monitoring points. Since this time, temperature changes at the level of depths of zero annual amplitudes

did not exceed 0.2–0.3 °C. The interannual variability of the average temperature of the active layer is higher, while the nature of the changes is not unambiguous. Soils and grounds of wintering stations near oil depots accumulate petroleum hydrocarbons – from 150 to 600, and in local cases 2200 mg/kg or more, which corresponds to medium and high levels of pollution at a background concentration of 40–60 mg/kg. Soils subjected to anthropogenic influence contain 3–10 times more As, Pb, Cd, and Cs than their background analogues.

**Key words:** *active layer dynamics, Antarctic soil maps, anthropogenic factor, borehole temperatures, <sup>14</sup>C-data, CO<sub>2</sub>-emission, organo-mineral interactions, ormitogenic factor.*

**Резюме.** По данным микроморфологического исследования степень выраженности органо-минерального взаимодействия в почвах Антарктиды невелика. В них не происходит активного биогенного выветривания почвообразующих пород, формирования устойчивых агрегатов и структур, глубокой минерализации и гумификации органического вещества из-за действия лимитирующих факторов природной среды. В антарктических оазисах значительную «помощь» почвообразованию оказывает перенос вещества из морских и/или озёрных экосистем и его перераспределение в субаэральном слое посредством птиц. Ветровая тень в сочетании с умеренным снегонакоплением обеспечивает снабжение талой водой в летний период и создаёт локальные условия для наиболее продвинутых форм почвообразования, увеличения запасов почвенного органического углерода и высоких значений эмиссии диоксида углерода. На основе авторской базы данных по <sup>14</sup>C возрастам почв выделены лабильный, переходный и стабильный пулы органического углерода и его предполагаемые источники для почв и почвоподобных тел оазисов Восточной Антарктиды. Представлены примеры почвенных покровов основных почвенно-климатических выделов – низко-антарктических тундропустошей, средне-антарктических снежниковых криптогамных пустошей и переходного варианта между холодными пустынями и криптогамными пустошами. Сформированная в 2007 г. сеть температурного мониторинга на поверхности пород и в деятельном слое состоит из пяти скважин и более десяти пунктов. За это время изменения температур на уровне глубин нулевых годовых амплитуд не вышли за 0,2–0,3 °C. Межгодовая изменчивость средних показателей температуры деятельного слоя выше, при этом характер изменений не носит однозначной направленности. Почвы и грунты зимовочных станций вблизи нефтебаз накапливают нефтяных углеводородов – от 150 до 600 мг/кг, а в локальных случаях 2200 мг/кг и более, что соответствует среднему и высокому уровням загрязнения при фоновой концентрации 40–60 мг/кг. Почвы, подвергшиеся антропогенному влиянию, содержат в 3–10 раз больше As, Pb, Cd и Cs, чем их фоновые аналоги.

**Ключевые слова:** *антарктические карты почв, антропогенный фактор, данные радиоуглеродного датирования, динамика деятельного слоя, органо-минеральные взаимодействия, орнитогенный фактор, температуры в скважинах, эмиссия диоксида углерода.*

## **Введение**

Открытие материка Антарктиды состоялось 200 лет назад. И, вот уже более половины этого срока исследуется, казалось бы, не слишком важный объект этого холодного континента – почвы. Ведь, даже исходя из самых оптимистических оценок, свободная ото льда суша занимает менее 0,5% территории Антарктиды и почвы с развитыми макропрофилями и морфологически выраженными поверхностными горизонтами, в свою очередь, занимают от 1 до 5% от этой территории (Bockheim, 2015). Первые химические анализы образцов антарктической почвы были выполнены Х. Йенсенем (Jensen, 1916). Однако масштабные почвенные исследования стартовали существенно позже – в конце 1950-х годов, во время Международного геофизического года. В рамках первых советских антарктических экспедиций К.К. Марковым была собрана обширная коллекция образцов пород и почвоподобных тел в оазисах Восточной Антарктиды, что позволило М.А. Глазовской в 1958 г. провести исследование почвообразования и первичного выветривания на гранитах и долеритах, ставшее впоследствии классическим в мировой литературе (Глазовская, 1958).

С тех пор, на протяжении более чем полувека, подавляющая часть почвенно-генетических работ выполнялась преимущественно зарубежными специалистами в районе Сухих долин и Трансантарктических гор, а также на Антарктическом полуострове и прилегающих островах (Blakemore, Swindale, 1958; Flint, Stout, 1960; Ugolini, Bull, 1965; Claridge, 1965; Tedrow, Ugolini, 1966; Jackson et al., 1977; Ugolini, Jackson, 1982; Campbell, Claridge, 1987; Tatur, Myrcha, 1989; Глазовская, 2002; Bockheim, 1977, 2002; Bockheim et al., 2007; Bockheim, McLeod, 2008; Simas et al., 2006, 2008; McLeod, 2012 и др.).

Российский этап почвенных исследований Антарктиды выглядит следующим образом. После первых работ (Глазовская, 1958; Сыроечковский, 1959), почвы попутно изучались при ландшафтных исследованиях (Симонов, 1971; Александров, 1985), а собственно почвенно-мерзлотные исследования возобновились в 1994–1998 гг., когда Д.А. Гиличинский, Д.Г. Федоров-Давыдов, В.А. Сороковиков и В.Е. Остроумов с зарубежными коллегами оказались в Сухих Долинах (станция «Мак-Мёрдо»). Результатом этого стала серия публикаций с американскими соавторами по микроорганизмам, обитающим в почвах и сохраняющим жизнеспособность в многолетней мерзлоте (Wilson et al., 1996; Friedmann et al., 1996; Gilichinsky et al., 2007). Позже была выпущена статья М.А. Глазовской

(2002), где рассмотрено интенсивное биохимическое выветривание пород под различными типами растительности субантарктического острова Кинг-Джордж. По свойствам почв Западной Антарктиды и их генезису на русском языке впервые были опубликованы работы наших коллег из Санкт-Петербурга (Власов и др., 2005; Абакумов и др., 2008; Абакумов, 2011; Абакумов, Крыленков, 2011 и др.). Начиная с 53 РАЭ (2007–2008) почвенно-геокриологические исследования систематически проводятся сотрудниками Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХиБПП РАН) и Института географии РАН (ИГ РАН) (Горячкин и др., 2009; Gilichinsky et al., 2010; Мергелов, Горячкин, 2010; Абрамов и др., 2011; Мергелов и др., 2016 и др.).

Геокриологические исследования входили в программу двух первых советских антарктических экспедиций (1956–1957). На станции Мирный была организована площадка для мониторинга температурного поля поверхности и пород до глубины 2,4 м, где среднегодовая температура составила  $-8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; расчётным путём была установлена максимальная мощность многолетнемерзлых пород в 130–160 м. В районе полевой базы в оазисе Бангера термометрические наблюдения проводились на глубинах до 1,2 м, для измерения глубины оттаивания использовался мерзлотомер Данилина. Диапазон измеренных глубин оттаивания на территории оазиса Бангера составил от 10 см на приозёрных участках, покрытых слоем сухих водорослей, до 1,6 м на дренированных хорошо прогреваемых площадках в центральной части оазиса. В районе станции Мирный глубина проникновения нулевой изотермы в скальные породы составила 2 м. Измерения температур в донных осадках показали, что максимальная мощность подошренных таликов может достигать 20 м. При проходке шурфов были встречены повторно-жильные льды (результаты работ Б.И. Втюрина, В.Н. Добровольского, Н.Ф. Григорьева публиковались в регулярных сборниках трудов советских антарктических экспедиций).

В сезон 25-й Советской Антарктической экспедиции (САЭ) (1979–1980) Б.И. Втюрин проводил геокриологические исследования в оазисе Ширмахера и Холмах Тала, в 28-й САЭ (1982–1983) на о. Кинг-Джордж. В оазисе Ширмахера был установлен диапазон глубин сезонного оттаивания от 8 до 70 см, для льдистых, насыщенных остатками водорослей грунтов и сухих мелкодисперсных отложений, соответственно (Vtyurin, 1986). Для полуострова Файлдс (о. Кинг-Джордж), глубины сезонного оттаивания составили от 0,35 м в обогащённых органикой до 1,2 м в крупнообломочных отложениях (Vtyurin, Moskalevskiy, 1985).

Поскольку значительный материал по почвам и многолетнемёрзлым породам уже был опубликован коллективом сотрудников ИФХиБПП РАН, ИГ РАН и СПбГУ, в том числе и в сборнике «Вопросы географии» № 142 (Мергелов и др., 2016), в данной работе мы сфокусируемся на ранее не исследованных аспектах изучения почв, почвенного покрова и многолетнемёрзлых пород Антарктиды, а также на антропогенном воздействии на почвы региона. Классификационные названия даны по Классификации и диагностике почв России (2004) с некоторыми добавлениями, поскольку в России таких почв как в Антарктиде почти нет.

### **Разнообразие педогенных процессов в антарктических почвах**

Почвообразование в свободных ото льда оазисах континентальной Антарктиды до сих пор ставится под сомнение многими исследователями и прежде всего потому, что в «почвоподобных телах» здесь зачастую отсутствуют привычные в других природных обстановках признаки организации материала, слагающего почвенный профиль: наличие поверхностных органических горизонтов, дифференциация нижележащих минеральных и их пространственная выдержанность; значимое содержание органического вещества в материале; формирование структурных отдельностей разного порядка; наличие выраженного взаимодействия органической и минеральной составляющей почв, инситу образование вторичных минералов и др. Истинно почвенные процессы трансформации и аккумуляции органического вещества, его взаимодействия с минеральной матрицей почв выражены довольно слабо, а иногда форма их выражения не имеет аналогов среди ранее изученных «зональных» почв. В большинстве описанных почв отсутствуют привычные органические и органоминеральные горизонты, они преимущественно представлены смесью детрита органических остатков мхов и лишайников с щебнистым элювием и лишены видимых при морфологическом описании признаков органоминерального взаимодействия.

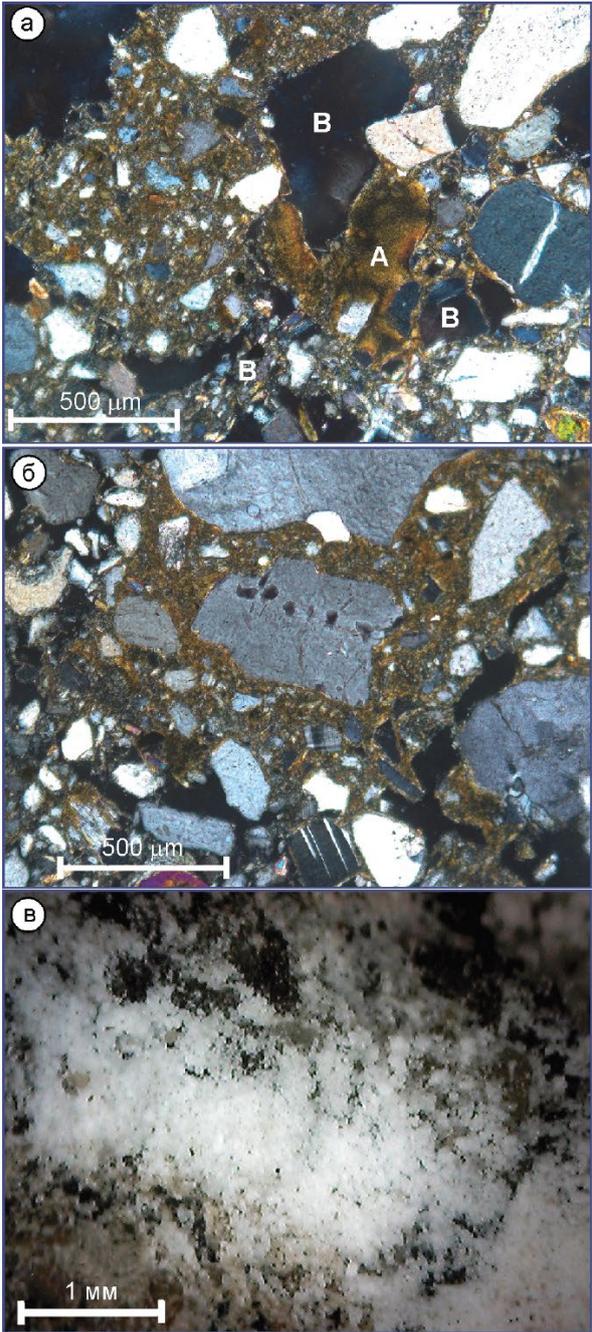
Исследования почв на субмикро- и микроуровне выявили некоторые особенности организации почвенного материала. Показано, что основными элементами микростроения служат грубообломочный скелет и пустоты, а преимущественной формой распределения глинистых частиц в мелкоземистой основе является диффузная (Kubienna, 1970; Абакумов и др., 2013). Анализ показал, что часто в материале между крупными отдельностями скелета формируются микрозоны относительной ста-

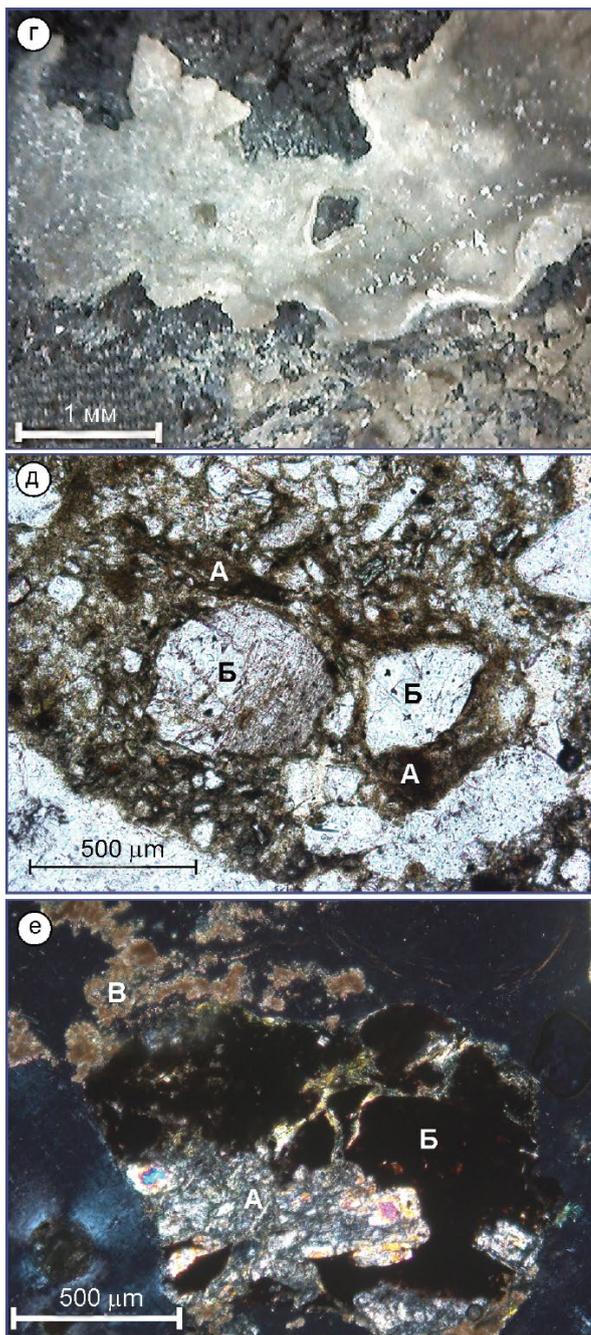
бильности сложения минеральной матрицы. Несмотря на гранулярное и плазменно-песчаное микростроение основы, формируются микроучастки глинистой плазмы, обладающие признаками подвижности, аккумуляции, оптической ориентировки и чаще всего не имеющие признаков ожелезнения (рис. 1, а). Отдельные минеральные зёрна покрыты тонкими глинистыми плёнками и кутанами, что дополнительно свидетельствует о подвижности глинистого материала в этих микрозонах.

В материале почв зашельфовых оазисов (оазис Ширмахера, оазис Холмы Бангера) проявляются признаки формирования и перераспределения новообразований карбонатов. Наблюдается агрегация минеральных частиц посредством цементации их микрокристаллическим кальцитом (рис. 1, б). Редкие отдельные глинисто-карбонатные кутаны по порам также указывают на относительно стабильное микростроение материала. На наличие сезонной динамики выделения карбонатов на поверхностях крупных минеральных отдельностей указывает разнообразие их морфологических форм на верхних и нижних поверхностях (рис. 1, в, г).

Признаки взаимодействия органической и минеральной составляющих почв (кроме широко распространённой и ранее описанной аккумуляции частиц детрита на поверхностях минеральных зерен) проявляется в формировании гумусовой плазмы на поверхностях отдельных зёрен скелета, находящихся в ризоидальной сфере моховых подушек или контактирующих с талломами альгобактериальных матов (рис. 1, д). Специфический тип органической плазмы формируется в почвах под гуано птиц. Плазма имеет выраженное потёчно-слоистое строение, с отдельными вихреватыми зонами; плотно облекает поверхности минеральных зерен, формируя мощные плёнки и образуя зоны компактного сложения скелета. В отдельных микрозонах формируются её сгустки и стяжения, в периферических частях которых наблюдаются выделения мельчайших кристаллов солей биогенного происхождения – фосфатов и сульфатов (рис. 1, е). Плазма включает многочисленные гифы и спорангии грибов, колонии одноклеточных водорослей.

Профили антарктических почв редко имеют мощность более 20–30 см. Они высоко литогенны – каменность верхних горизонтов может достигать 95–98%, убывает книзу до 50–70%; содержание мелкозёма возрастает книзу от 1% до 12–20% у контакта с массивной или слабовеветрелой скальной породой (Абакумов, 2010; Лупачев, Абакумов, 2013). Почвенный материал под лишайниковыми сообществами зачастую лишён агрегации и микроагрегации. В редких слу-





**Рис. 1.** Морфологическое строение некоторых почв Антарктики. а – оазис Ширмахера, скопления ориентированной глины (А) в микрочастицах относительной стабильности сложения скелетного материала (В), X N; б – оазис Ширмахера, цементация отдельностей скелета карбонатно-глинистой плазмой, X N; в – оазис Холмы Бангера, новообразования карбонатов на верхних поверхностях фрагментов элювия; г – оазис Холмы Бангера, новообразования карбонатов на нижних поверхностях фрагментов элювия; д – оазис Ширмахера, органично-минеральные плёнки (А) на поверхностях минеральных зёрен (Б), II N; е – остров Кинг-Джордж, органогенная плазма (А) с элементами потёчно-слоистого строения на поверхностях минеральных зёрен (Б) и выделения солей биогенного происхождения (В), X N

чаях талломы, образующие густую сеть, консолидируют материал поверхностных горизонтов, предохраняя его от коррадирующего ветрового воздействия. Выделение генетических горизонтов в ряде случаев возможно лишь по изменению гранулометрического состава, а также по обилию железистых пленок, натёков мелкозёмистого материала, покрывающих минеральные отдельности.

При наличии на поверхности почв моховых подушек, растения, развисясь, облекают крупные фрагменты элювия, а более мелкие (до 1–3 см) оплетаются ризоидальной массой. В последнем случае формируются уникальные агрегаты размером до 2–3 мм, так называемые «бусы» – своеобразный аналог оструктурирования в почвах с участием корневых систем высших растений. В подобных зонах появляется кайма слабой гумусовой пропитки залегающего глубже мелкозёма. В почвах под водорослево-бактериальными матами в прибрежной части пульсирующих озёр довольно типично развитие почв по солончаковому типу. В них диагностируются тёмно-серые горизонты сульфидного засоления, сизые оглеенные и ярко-охристые железисто-метаморфические горизонты. В отдельных случаях, при достаточном количестве почвенной влаги и наличии мерзлотного или скального водоупора, строение генетических горизонтов может нарушаться криотурбациями (Мергелов, Горячкин, 2010).

Крайне редкие случаи пространственной выдержанности сомкнутого растительного покрова (обширные моховые подушки, «ковры» из кустистых лишайников) или зоогенного органического материала («плащи» гуано) встречаются преимущественно в Субантарктике. Но и здесь степень выраженности органоминерального взаимодействия невелика – из-за действия лимитирующих факторов природной среды не происходит активного биогенного выветривания почвообразующих пород, формирования устойчивых агрегатов и структур, глубокой минерализации и гумификации органического вещества.

### **Орнитогенные почвы**

Накопление гуано, строительство гнёзд пингвинами и другими птицами приводит к формированию полипедонов почв, гранулометрический состав которых отличается повышенным содержанием скелетной фракции и формированию выраженной почвенной структуры (Иванов, Авессаломова, 2012), а содержание и запасы азота превышают таковое в почвах, где нет орнитогенного воздействия в десятки раз. В наибольшей

степени орнитогенное почвообразование проявляется в маритимной части Западной Антарктики – на северной оконечности Антарктического полуострова и на островных архипелагах Субантарктики. Кроме непосредственного влияния птиц на локалитеты почв орнитогенных пляжей, их влияние распространяется путём частичного растворения и миграции веществ в ландшафте, нитрификации, что приводит к запуску посторнитогенных сукцессий и коренному изменению локальной геохимии ландшафта (Simas et al, 2008). Формируется своеобразный почвенный покров, состоящий из сочетаний почв, в составе которых орнитогенные местообитания геохимически сопряжены с окружающими понижениями рельефа, куда перераспределяются вещества.

Сукцессионные процессы, происходящие при зарастании орнитогенных местообитаний, изучены пока ещё недостаточно. Можно констатировать, что смена растительного покрова в местах гнездования птиц происходит под влиянием трёх основных факторов: 1) механического воздействия птиц на почву и растительный покров; 2) изменения химического состава почвы под влиянием птичьего помёта и органического вещества, которые выносятся птицами из моря; 3) механического переноса семян ряда видов растений и мелких беспозвоночных птицами, а также спор мхов, лишайников и грибов и резистентных стадий нематод и тардиград воздушными потоками. В зависимости от рельефа местности, высоты и удалённости колонии от моря, количества гнездящихся птиц, механического состава грунтов и других факторов могут наблюдаться различные вариации сукцессионных рядов. Тем не менее, общая тенденция, отмеченная многими исследователями и наблюдателями такова.

В непосредственной близости к местам гнездования высшие и низшие растения, как правило, отсутствуют. Камни и грунт здесь голые, либо изредка покрыты чистыми куртинами лишайника *Leptogium puberulum* (до 50–70%). На некотором отдалении от колонии, по мере уменьшения концентрации азота и фосфора и механического воздействия птиц, развиваются сообщества с доминированием водоросли *Prasiola crispa*. Грунт здесь закрыт сплошным ковром водорослей, иногда с вкраплениями лишайника *Xanthoria candellaria*. Следом поселяются нитрофильные лишайники, образующие нитрофильные сообщества. Проективное покрытие, преимущественно накипных лишайников, достигает здесь 50–100%, значительную часть его составляют лишайники рода *Caloplaca*. На сильно выступающих камнях лишайник *Lecania brialmontii* покрывает до 30% площади, вместе с ним растут лишайники *Amandinea*, *Leptogium*

*puberullum*, *Caloplaca*, *Xanthoria candellaria* и некоторые другие, появляются мхи. На скалах, нависающих над обрывами, в сторону берега моря, обильно разрастаются лишайники *Ramalina terebrata* и *Caloplaca*. На последних стадиях сукцессии, в случае достаточного увлажнения и соответствующего механического состава почв, появляются высшие растения – *Deschampsia antarctica* и реже – *Colobantus quitensis*, которые могут образовывать луговины достаточно большой площади. На камнях и щебне развиваются моховые и лишайниковые сообщества зонального типа.

Особый тип органогенных поверхностных горизонтов почв представляет гуано птиц, на материале которого развивается совершенно специфический тип растительного покрова с преобладанием нитрофильных видов. В развитии почв под гуано ясно наблюдается сукцессионная смена растительного покрова, связанная с уменьшением степени агрессивности свежего гуано в ходе его вымывания, высыхания и промораживания. С течением времени гуано темнеет и образует на поверхности вязкую субстанцию, которая покрывает и связывает верхний горизонт элювия и тем самым предохраняет нижележащие слои от иссушения и выдувания мелкозёма суровыми ветрами. В смеси минерального и органического материала часто встречаются фрагменты тканей птиц, их перья и части скелетов, скорлупа яиц и т.п. В данных почвах морфологически наблюдается снижение содержания мелкозёма с глубиной, что противоположно большинству почв Антарктики – материал гуано, высыхая, фиксирует на своей нижней поверхности значительное количество пылеватых частиц и мелких зёрен минералов, а также предохраняет поверхность элювия пород от интенсивной снежно-ледяной абразии. В случае прекращения существования колонии процессы криогенной сортировки материала перемещают крупные фрагменты элювия на поверхность, со временем погребая материал гуано.

### **Орнитохория как особый случай педогенеза в Антарктике**

Антарктическое почвообразование характеризуется крайней специфичностью. Это связано с изолированностью экосистем друг от друга и от других биомов суши (Мергелов и др., 2012; Vockheim, 2015). Эта изолированность, хотя и носит существенный характер, но не является полной. Орнитохория служит решающим процессом в ближнем и дальнем переносе веществ и энергии в Антарктиде, и связана она не столько с пингвинами, сколько с поморниками, буревестниками и другими мигрирующими перелётными птицами. Именно с их активностью

связана частичная изолированность популяции щучки антарктической (*Deschampsia antarctica*), поскольку орнитохория не даёт изоляции быть полной (Peter, 2008; Парникоза и др., 2015). Перелётные птицы играют решающую роль в обмене генетическим материалом, а также в переносе генеративных и вегетативных органов низших и сосудистых растений и мелких беспозвоночных на большие расстояния (Abakumov et al., 2016; Parnikoza et al., 2016; Yudakova et al., 2016), благодаря чему даже изолированные морены и нунатаки, а также участки суши зашельфовых оазисов колонизируются мхами, лишайниками, водорослями, представителями злаковых и нематодами – сапрофагами и паразитами.

Расселение *Deschampsia antarctica* путём орнитогенного переноса – важнейший фактор колонизации свободных субстратов и почвообразования как в прибрежной части, так и на островной территории, в том числе и в зонах современной дегляциации. Поморники регулярно нарушают поверхность органогенных горизонтов, перенося материал щучки для строительства гнёзд на дальние расстояния. На полуострове Файлдс существуют целые ареалы щучки, имеющие орнитогенное происхождение. Нередко куртинки щучки прорастают на поверхности органогенного материала мха, но бывают случаи колонизации минерального субстрата. В конечной стадии постоянное обогащение локалитета органическим веществом приводит к формированию относительно мощных органогенных горизонтов (рис. 2).

Таким образом, проведённые исследования показали, что орнитогенный фактор проявляется не только в формировании классических орнитогенных почв под гуано пингвинов, но и в других, менее известных формах. Перенос органического материала способствует колонизации свободных субстратов, формированию органогенных горизонтов почв. Сами гнёзда поморников влияют на плотность почв, их обогащённость азотом и содержание в них органического вещества. Роль орнитогенного фактора в почвообразовании в Южном полушарии, таким образом, существенно выше, чем считалось раньше.

## **Почвоподобные образования с криптоорнитогенными горизонтами**

Экстремальные климатические условия в Антарктиде определяют барьер на поверхности рыхлых и плотных пород, который не может быть преодолен организмами при колонизации исключительно при помощи физиологических адаптаций. Высокий уровень ультрафио-



**Рис. 2.** Орнитогенные локалитеты щучки *Deschampsia antarctica*: прорастание щучки, принесённой птицами на места гнездования поморников

летнего излучения, недостаток влаги, резкие перепады температуры, а также сильный ветер приводят к тому, что условия внутри почвы или породы могут оказаться более благоприятными, чем на их поверхности. Поэтому в Антарктиде формируется целый ряд почвоподобных образований, у которых органогенные горизонты находятся не на поверхности, а в скрытых нишах внутри субаэрального сегмента плотной породы (эндолитные различия) или рыхлого материала под пустынной мостовой (гиполитные различия) (Мергелов и др., 2012; Мергелов, 2014; Mergelov et al., 2018; Mergelov et al., 2020).

Общее свойство эндолитных и гиполитных почвоподобных образований – первичная продукция, последующее накопление органического вещества, а также наиболее интенсивные биоминеральные взаимодействия, происходят не на поверхности, а внутри минерального каркаса. Живая и мёртвая биомасса организуется в виде отдельного микрогоризонта в пределах 1 см от поверхности для эндолитного образования и 5 см для гиполитного и покрывает зёрна минералов биоплёнками толщиной до десятков микрон. Компоненты органического вещества участвуют в биохимическом выветривании силикатов, новообразовании минералов, а также оструктурировании выветрелой

минеральной массы. Такие функции гипо- или эндолитного крипто-органогенного горизонта роднят его с «классическими» поверхностными органогенными горизонтами почв.

Ведущим параметром, определяющим распространение эндолитных и гиполитных почвоподобных образований, является литогенный фактор, а именно наличие в породе пропускающих свет минералов (кварца и полевых шпатов), а также развитого порового пространства. При выполнении этих условий криптоорганогенные горизонты могут быть обнаружены в очень широком диапазоне локальных условий. Наиболее развитые почвоподобные профили формируются на песчаниках, конгломератах, гранитоидах и гнейсах с повышенным содержанием кварца и полевых шпатов. Для формирования гиполитных органогенных горизонтов также важен размер, форма и плотность сложения мелкообломочного материала пустынных мостовых, что влияет на проникновение света.

### **Особенности экологического функционирования почв Антарктиды**

*Длительность депонирования органического углерода.* До последнего времени считалось, что большинство почв в береговой зоне Антарктиды имеют возраст последнего ледникового максимума или моложе (Bockheim, 2015). Однако данные о радиоуглеродном возрасте органического вещества почв и почвоподобных тел Антарктиды, которые могли бы напрямую подтвердить время актуального почвообразования в этом регионе, до сих пор остаются немногочисленными (Zazovskaya et al., 2017). Детальные исследования радиоуглеродного возраста почв и почвоподобных тел было проведено для оазисов Ширмахера, Холмы Тала, Холмы Ларсеманн и отдельно стоящих нунатаков в окрестностях оазиса Ширмахера. Датировалось органическое вещество практически всех почвенных разностей, представленных в оазисах Восточной Антарктиды – эндолитных и гиполитных почвоподобных тел, почв ветровых убежищ, почв, формирующихся под моховой и мохово-лишайниковой растительностью с микро и макро-профилями. Большинство имеющихся сейчас в базе данных дат получены с использованием ускорительной масс-спектрометрии. По известным палеогеографическим данным дегляциация изученных оазисов произошла в позднем плейстоцене (оазис Холмы Ларсеманн) и в раннем

голоцене (оазисы Холмы Тала, Ширмахера). Однако одним из нерешённых (дискуссионных) до сих пор вопросов остаётся вопрос о возможности непрерывного формирования органопротилей почв с момента последних отступаний ледников в оазисах Восточной Антарктиды.

Исходя из наших данных большинство верхних горизонтов почв, изученных в оазисах Восточной Антарктиды, имеют подавляющую часть органического вещества современного возраста (рМС – процент современного углерода  $>100$ <sup>1</sup>), однако в 25–35% случаев органический углерод стабилизируется около 100 лет в гиполитных системах (цианобактерии доминируют в этих системах), около 1000 лет в моховых органогенных горизонтах, в том числе в почвах ветровых убежищ и почвах с макропрофилями, развитыми под моховой растительностью. В эндолитных системах органический углерод может стабилизироваться не менее 500 лет (Мергелов и др., 2012), а в отдельных случаях и несколько тысяч лет. Однако, исходя из наблюдаемых масштабов и скоростей десквамационного обновления скальной поверхности и полученных дат, такие древние эндолитные экосистемы – скорее исключение и в условиях Антарктики они, по-видимому, могут формироваться лишь в редких убежищах.

В почвах, развивающихся в ветровых убежищах или занимающих эпидафическую нишу (с микро- и макропрофилями), наблюдается постепенное увеличение радиоуглеродного возраста вниз по профилю, что также служит подтверждением принципиальной возможности формирования устойчивых органических и органоминеральных соединений при бедности исходного вещества полициклическими органическими соединениями и замедленного биологического круговорота. Однако нельзя исключать и вклад углерода, унаследованный от предыдущих периодов почвообразования. Данные изотопного состава углерода исследуемого органического вещества не позволяют предположить участие привнесённого углерода морского происхождения, но вполне согласуются с перераспределением из эндолитных систем и погребение углерода, ранее сформированного в мохово-водорослевых и мохово-лишайниковых сообществах. В определённых случаях мы можем говорить о том, что даже погребение слоем 1–2 см мелкозёма является довольно

---

<sup>1</sup> За рМС 100% в радиоуглеродном датирование принимается активность <sup>14</sup>C в 1950 г. до начала ядерных испытаний – это условный нуль, от которого считается радиоуглеродный возраст. рМС  $> 100\%$  характеризуются образцы, в которых присутствует бомбовый углерод.

эффективным механизмом стабилизации, например, цианобактериальных плёнок возрастом около 1000 лет (Mergelov et al., 2020).

По обобщённым данным возраст современного этапа педогенеза в оазисах Восточной Антарктиды не превышает 500–1000 лет. Отсутствие почв, возраст которых соответствовал бы времени последней дегляциации на изученных территориях, может быть объяснено специфическими климатическими и ландшафтными условиями почвообразования: сильными кatabатическими ветрами; преимущественным формированием почв с органопрофилем в местах, подверженных интенсивной водной эрозии; локальными катастрофическими явлениями, уничтожающими почвенный покров.

Бёркинс с соавторами (Burkins et al., 2001) сделали вывод о двухуровневом углеродном цикле в почвах Сухих Долин, в котором древний углерод находился в довольно стабильном ("устойчивом") резервуаре, отделённом от быстро обновляющегося углерода в "лабильном" резервуаре. Барретт с соавторами (Barrett et al., 2006) выделили 4 углеродных пула в почвах Сухих Долин и предложили модель резервуарного стока, которая описывала круговорот углерода среди автотрофной биомассы, гетеротрофной биомассы, лабильного и пассивного пулов.

Полученные нами данные показывают, что в экстремальных условиях Антарктики, где источником органического вещества служат не сосудистые растения, а лишь некоторые криптогамные организмы и микробные фотоавтотрофы, может формироваться пул почвенного органического вещества, устойчивый во времени. Полученный набор радиоуглеродных данных подтверждает гипотезу о наличии в почвах Антарктики нескольких разновременных углеродных пулов, как и в большинстве арктических почв и в обычных почвах более мягкого климата. Экспертная оценка, сделанная на основе анализа нашей базы данных по  $^{14}\text{C}$  возрастам, позволила выделить следующие пулы органического углерода и его предполагаемые источники для почв и почвоподобных тел оазисов Восточной Антарктиды: лабильный, переходный и стабильный (табл. 1.).

**Запасы органического углерода и эмиссия диоксида углерода.** Почвы береговых и зашельфовых оазисов Восточной Антарктиды функционируют в условиях положительных температур лишь короткий период, длиной менее трёх месяцев, в условиях отсутствия жидких осадков и питания за счёт талых вод снежников. Наиболее богатые органическим веществом почвы связаны напрямую с распростра-

**Таблица 1.** Вклад разных источников углерода в формирования почв и почвоподобных тел оазисов Восточной Антарктиды (экспертная оценка на основе  $^{14}\text{C}$  данных)

Пул углерода	Возраст	рМС (доля современного углерода), по $^{14}\text{C}$ данным, %	Возможный источник углерода	Возможные механизмы стабилизации органического вещества	Группы почв/ почвоподобных тел
Лабильный пул	$10^0$ – $10^2$ лет ВР	119–99	эоловый привнос/ перенос мелкозёма; продукты быстрого разложения автотрофной биомассы; продукты быстрого разложения гетеротрофной биомассы	—	почвы под мохово-лишайниковой растительностью с микропрофилями; гиполитные почвы; эндолиты; почвоподобные тела на многолетних и однолетних снежниках
Переходный пул	$n \times 10$ – $10^2$ лет ВР	99–88	продукты разложения автотрофной биомассы; продукты разложения гетеротрофной биомассы; перераспределённый углерод эндолитных систем	химическая/ физическая стабилизация	почвы под моховой растительностью с макропрофилями; почвы под моховой растительностью в ветровых убежищах; орнитогенные почвы; гиполиты; эндолиты
Стабильный пул	$n \times 10^3$ лет ВР	<88	устойчивые продукты разложения автотрофной и гетеротрофной биомассы; унаследованный от прошлых периодов почвообразования углерод; углерод «ледникового происхождения	физическая стабилизация	почвы под моховой растительностью в ветровых убежищах; эндолиты; погребённые мелкозёмом горизонты гиполитных почв; погребённые горизонты почв с остатками моховой растительностью; криокониты

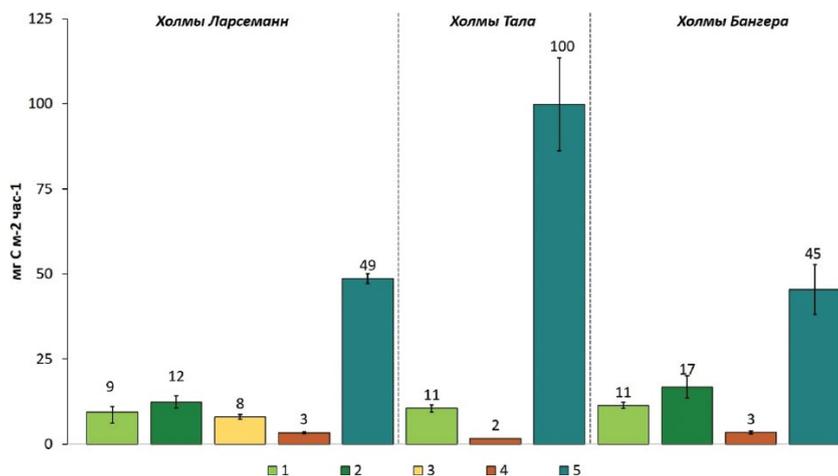
нением растительности по местам достаточного увлажнения, чаще всего это днища структурных долин (Мергелов, 2014). Здесь развиты поверхностные органогенные горизонты в зависимости от типов доминирующей растительности. В основном почвы долин имеют супесчано-песчаный состав и могут классифицироваться как псаммозёмы (например, оазисы Холмы Ларсеманн, Холмы Тала), в отдельных случаях доминируют почвы на суглинистых отложениях, в таких случаях почвы относятся к пелозёмам (оазис Холмы Бангера). Выделяется следующий ряд псаммозёмов и пелозёмов (Пс/Пе) по уменьшению влажности горизонта 1–3 см: 1) Пс/Пе с субаквальными/амфибильными альгобактериальными органогенными горизонтами; 2) Пс/Пе с эпиздафическими органогенными горизонтами с доминированием

мхов; 3) Пс/Пе с гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий; 4) Пс/Пе без макроскопических органогенных горизонтов («безгумусовые» почвы, *ahumic soils*). Обособленно выделяются почвы ветровых убежищ: псаммозёмы, литозёмы перегнойные, торфяно-литозёмы с органогенными горизонтами с доминированием мхов, местами с признаками альфегумусовой миграции.

Мы провели измерения эмиссии диоксида углерода на основных типах почв оазисов Холмы Бангера, Холмы Ларсеманна, Холмы Тала методом закрытых камер с использованием модифицированного портативного газоанализатора AZ-77532 (AZ Instruments, Тайвань), подробно методика описана в (Карелин и др., 2015). Для основных типов почв перечисленных оазисов определено содержание органического углерода на CHN-анализаторе Vario Elementar, рассчитаны запасы углерода для верхней 50-сантиметровой толщи, в случае близкого залегания скалы – для фактической толщи мелкозема.

Почвы влажных долин, а также почвы ветровых убежищ – наиболее важные участники биогеохимического круговорота углерода в условиях отсутствия прямого и косвенного орнитогенного привноса органического вещества. Доля дыхания почв, причём именно эмиссии диоксида углерода, максимальна в углеродном балансе наземных экосистем антарктических оазисов, где доля первичной продукции минимальна, в условиях общего проективного покрытия растительности в оазисах часто менее 1%. Дыхание почв оазисов Восточной Антарктиды характеризуется отсутствием «классического» корневого дыхания (есть только дыхание ризоидов мха) и доминированием микробияльного не только гетеротрофного, но и автотрофного (в первую очередь цианобактерии) дыхания.

Для всех исследованных оазисов выявлены сходные закономерности в дыхании почв. Наибольшие значения эмиссии диоксида углерода характерны для почв ветровых убежищ (42-114 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-17</sup>) (рис. 3). Сезонная и межгодовая динамика скорее зависит от уровня увлажнения в конкретный летний сезон (количество талой воды как от зимних, так и летних твёрдых осадков), чем от длительности экспонирования растительного покрова без снега летом (в днях), когда в случае невысокого уровня поступления талой воды от летних снегопадов биологическая активность оказывается подавленной. Снижение влажности почвы с 40 до 10% приводит к снижению эмиссии диоксида углерода более чем втрое. Существенно ниже эмиссия ди-



**Рис. 3.** Почвенная эмиссия диоксида углерода (декабрь 2018 – январь 2019 гг.): 1 – псаммозёмы/пелозёмы с субаквальными/амфибиальными альгобактериальными органогенными горизонтами; 2 – псаммозёмы/пелозёмы с эпизодафическими органогенными горизонтами с доминированием мхов; 3 – псаммозёмы/пелозёмы с гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий; 4 – псаммозёмы/пелозёмы без макроскопических органогенных горизонтов («безгумусовые» почвы, ahumic soils); 5 – почвы ветровых убежищ (псаммозёмы, литозёмы перегнойные, торфяно-литозёмы с органогенными горизонтами с доминированием мхов, местами с признаками альфегумусовой миграции)

оксида углерода у почв влажных долин, где максимум у почв с эпизодафическими органогенными горизонтами с доминированием мхов (11–20 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>), далее у почв с субаквальными/амфибиальными альгобактериальными органогенными горизонтами (7–12 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>). Наименьшие значения эмиссии диоксида углерода соответствуют почвам без макроскопических органогенных горизонтов (2–3 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>), причём в летний период отрицательные значения крайне редки. Несколько выше у почв с гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий 7–9 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>).

Поверхностные потоки диоксида углерода в Сухих Долинах в основном от –4,3 до 6,5 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>, но на участках с максимальным содержанием органического углерода и наибольшей влажностью достигает 34 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> (Parsons et al., 2004; Gregorich et al., 2006). Средняя почвенная эмиссия диоксида углерода на о. Кинг-Джордж составляет от 3,5 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> в разностях без органогенных гори-

зонтов до 52 мг С м-2 ч-1 в почвах с мощными моховыми подушками и 93,5 мг С м-2 ч-1 в почвах, где распространены злаки *Colobanthus quitensis* и *Deschampsia antarctica* (Thomazini et al., 2016). Для почв на архипелаге Земля Франца-Иосифа (высокоарктические тундропустоши и тундры) эмиссия диоксида углерода в пределах 6–94 мг С м-2 ч-1 (Никитин и др., 2020).

Таким образом, дыхание некоторых почв в оазисах Восточной Антарктиды оказывается на уровне дыхания почв, формирующихся в более тёплых условиях Субантарктики и Арктики (Земля Франца-Иосифа). Однако площадь распространения таких почв минимальна в оазисах. В целом, средняя почвенная эмиссия диоксида углерода в исследованных оазисах Холмы Бангера, Холмы Ларсеманн, Холмы Тала выше, чем в Сухих Долинах (высокоантарктические холодные пустыни), но ниже в несколько раз по сравнению с низкоантарктическими тундропустошами (о. Кинг-Джордж) и островами Высокой Арктики (Земля Франца-Иосифа).

Наиболее богаты органическим веществом в оазисах Холмы Бангера и Холмы Тала почвы ветровых убежищ с перегнойно-торфяными горизонтами (5,2–11,5 и 4,7–12,1 кг С м-2 соответственно), где запасы зависят от как от мощности мелкозёмистой толщи (10–35 см) и органических горизонтов (3–25 см) (рис. 4). Орнитогенные почвы колоний пингвинов Адели, оазиса Холмы Тала (мощность профиля 30 см, птицы гнездятся на скалах и сами приносят мелкий щебень, впоследствии уже накапливается мелкозём, цементирующий конструкцию гнезда) содержат 11,0 кг С на м<sup>2</sup>.

В почвах ветровых убежищ оазиса Холмы Ларсеманн запасы органического углерода ниже (3,5 кг С м-2), что обусловлено менее благоприятными условиями (более расчленённый рельеф и недостаточное увлажнение) по сравнению с оазисами Холмы Бангера и Холмы Тала. В оазисе Холмы Ларсеманн наибольшие запасы органического углерода характерны для псаммозёмов с субаквальными/амфибиальными альгобактериальными органическими горизонтами (3,9 кг С м-2) и с эпизодафическими органическими горизонтами с доминированием мхов (3,6 кг С м-2). В таких же экологических нишах в почвах Холмов Бангера и Тала запасы углерода ниже, что обусловлено менее благоприятными условиями увлажнения верхних горизонтов. Для почв с гиполитными органическими и без макроскопических органических горизонтов в трёх оазисах характерны сходные запасы органические



**Рис. 4.** Запасы органического углерода в основных типах почв оазисов Восточной Антарктиды: 1 – псаммозёмы/пелозёмы с субаквальными/амфибиальными альгобактериальными органогенными горизонтами; 2 – псаммозёмы/пелозёмы с эпизодафическими органогенными горизонтами с доминированием мхов; 3 – псаммозёмы/пелозёмы с гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий; 4 – псаммозёмы/пелозёмы без макроскопических органогенных горизонтов («безгумусовые» почвы, ahumic soils); 5 – почвы ветровых убежищ (псаммозёмы, литозёмы перегнойные, торфяно-литозёмы с органогенными горизонтами с доминированием мхов, местами с признаками альфегумусовой миграции)

углерода (0,1–0,3 кг С м<sup>-2</sup>). Несмотря на относительно высокое содержание  $C_{\text{орг}}$  в гиполитных горизонтах в среднем 0,3–0,5%, по сравнению с остальной толщей и всем профилем «безгумусовых» почв, в которых органический углерод есть и его содержание в среднем 0,05–0,1%, суммарные запасы близки и зависят не только от содержания органического углерода в верхних 1–2 см, но и в середине профиля, где нередко погребённые органогенные горизонты мощностью 0,5–1,5 см.

Для участка Молодёжный оазиса Холмы Тала, имеющего площадь территории 10,1 км<sup>2</sup> (площадь суши, свободной от внутриоазисных снежников, ледников и озёр 3,44 км<sup>2</sup>) общий пул углерода, заключённого в почвах и почвоподобных телах (верхние 0,5 м), оценивается в 1245 Mg. Полученные данные сопоставимы с запасами углерода на ключевом участке оазиса Холмы Ларсеманн (Мергелов, 2014). Средняя величина на 1 км<sup>2</sup> для оазиса Холмы Тала оказалась на 25% меньше, по сравнению с Холмами Ларсеманн, но выше по сравнению с оазисом Холмы Бангера.

Запасы органического углерода в целом для почв оазисов Восточной Антарктиды (среднеантарктические снежниковые криптогамные пустоши) на единицу площади оказались в 2–10 раз ниже по сравнению с низкоантарктическими тундропустошами (на примере о. Кинг-Джордж).

### **Строение почвенного покрова Антарктики на разных уровнях организации**

**Общие закономерности.** По характеру почвенного покрова Антарктида – это не континент, а группа мелких и сильно удалённых друг от друга островов (Горячкин и др., 2012). Подобно тому, как острова в океане имеют свою специфику, «острова» в ледниках не менее специфичны. Они очень зависят от динамики окружающих их льдов, может быть больше, чем от широтного положения (самый северный в Восточной Антарктике российский континентальный «остров» Мирный при этом – самый ледяной и холодный из береговых). Размер оазиса, создающего специфический «оазисный эффект», имеет большое значение для условий почвообразования (Марков и др., 1968). То есть, мы имеем дело с «незональными» условиями. Подходить к географической оценке почвообразования в Антарктиде с традиционными «зональными» мерками (плакорные условия, годовое и летнее количество осадков, средние температуры воздуха, испаряемость, характер фитоценоза) не совсем корректно.

В связи с этим проводить в Антарктиде зональные почвенные границы, как это делалось ранее (Tedrow, 1977; Горячкин и др., 2003; Kimble, 2004; Абакумов, 2011), по-видимому, не совсем правильно. Кроме того, это может ввести в заблуждение исследователей, хорошо знающих идеи зональности, но не знающих специфики ледового континента. Ранее было предложено (Gogyachkin, 2018) существенно скорректировать подходы к зонированию почв Антарктиды, признав, что Антарктида – это единственный материк, для которого характерен «островной тип распределения почв».

Принципиально сохраняя три основных почвенно-климатических выдела (Горячкин и др., 2003) с частично изменёнными названиями – высокоантарктических холодных пустынь, среднеантарктических снежниковых криптогамных пустошей и низкоантарктических тундропустошей, мы допускаем целый ряд переходов между ними. Ярким переходом между холодными пустынями (наличие почв с различным типом засоления) и снежниковыми криптогамными пустошами (сплошной растительный

покров и почвы с относительно высокими запасами углерода в ветровых убежищах) является почвенный покров оазиса Холмы Бангера.

Центральными образами высокоантарктических холодных пустынь служат почвенные покровы с преобладанием очень холодных и сухих почв с крайне низким содержанием органического вещества и щелочными значениями рН (так называемые «безгумусовые» почвы). Увлажнённых почв в покрове очень мало, и они отличаются повышенным засолением (Fountain et al., 2011). Центральный образ среднеантарктических снежниковых криптогамных пустошей – это оазисы Восточной Антарктиды, которым преимущественно посвящена настоящая работа. Для них характерен контрастный почвенный покров, состоящий из слабнокислых почв, сильно различающихся по влажности и содержанию органического вещества в зависимости от влияния талых вод снежников. И наконец, центральный образ низкоантарктических тундропустошей (здесь на фоне преобладания криптогамных появляются и цветковые растения) – разреженный почвенный покров, развивающийся в условиях гумидного климата, в том числе и выпадающих жидких осадков, где возможны местообитания со 100%-ным проективным покрытием почвенно-растительного покрова, развитием торфообразования, гумусообразования и иллювиирования органо-минеральных соединений (Beyer, Boelter, 2002; Абакумов, 2011).

Основной группой почвенных комбинаций, характеризующих структуру почвенного покрова оазисов Антарктиды, является сочетание сильнокаменистых, испытывающих дефицит влаги почв под лишайниковой растительностью на водораздельных и склоновых элементах мезорельефа, на скальных останцах и более увлажнённых и обогащённых мелкозёмом и органическим веществом почв под мохово-лишайниковыми сообществами и альгобактериальными матами в локальных депрессиях и на скальных ваннах.

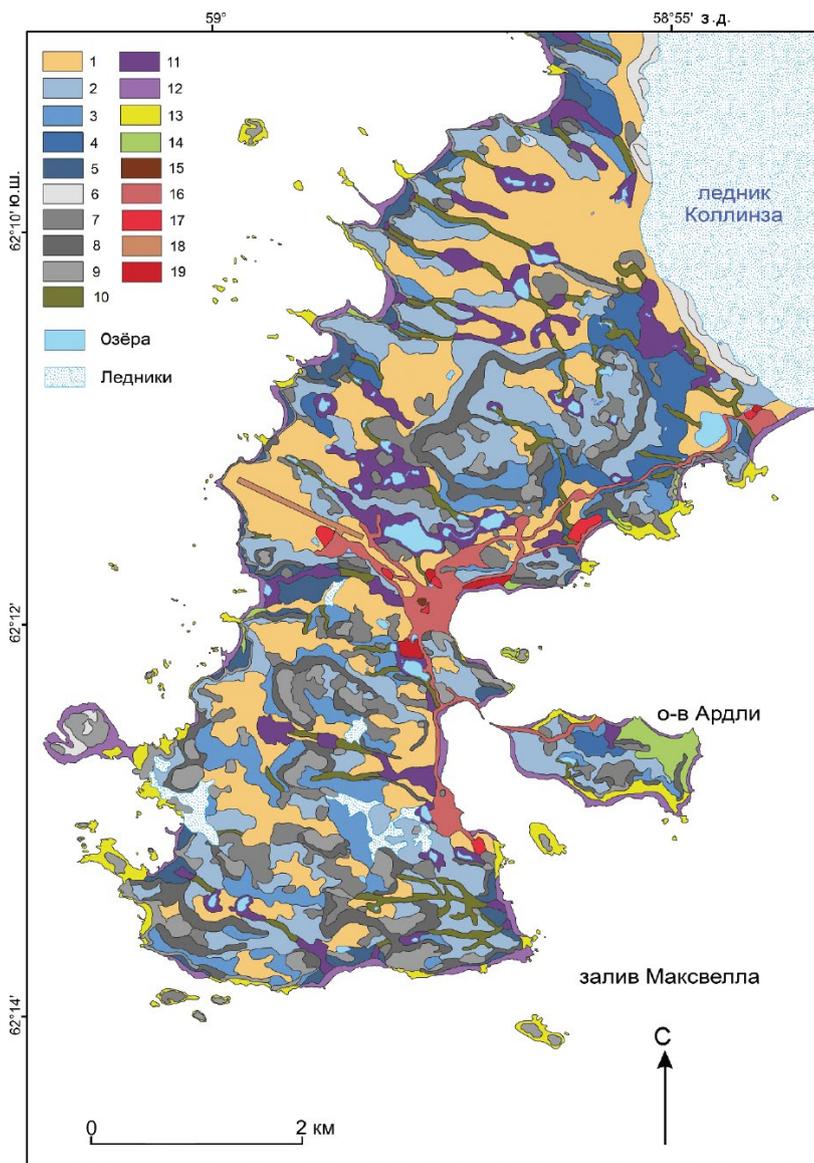
Сочетания, в отдельных, благоприятных для развития процессов криогенного массообмена местообитаниях, осложняются комплексностью строения почвенного покрова. Эти комплексы, обусловлены микрорельефом поверхности, формирующимся при образовании каменных колец и полос криогенной сортировки. В этих случаях центральные части колец, полигонов и мелкозёмистые участки между полосами лишены растительности, а на каменистых бордюрах и в полосах стока (зонах транзита талых вод, взвешенного минерального и органического материала) развиваются мощные моховые подушки и талломы кустистых лишайников.

Ниже представлены примеры почвенных покровов основных почвенно- климатических выделов – низкоантарктических тундропустошей, среднеантарктических снежниковых криптогамных пустошей и переходного варианта между холодными пустынями и криптогамными пустошами.

**Почвенный покров низкоантарктической тундропустоши на примере полуострова Файлдс, о. Кинг-Джордж.** Почвенный покров ключевого участка «Файлдс» (станция «Беллинсгаузен», о. Кинг-Джордж, Южно-Шетландские острова) изучался в ходе полевых сезонов в составе 55, 57 и 61 РАЭ (рис. 5). Около 40% площади участка занято почвами с льдистой мерзлотой в профиле и/или выраженными морфологическими проявлениями криогенного массообмена – криотурбациями, криогенной сортировкой, формированием каменной мостовой и т.д. – и могут быть отнесены к безгумусовым и грубогумусовым криозёмам. Эти почвы преимущественно занимают плоские водоразделы или пологие склоны с относительно мощным (около 0,5 м) чехлом рыхлых отложений и обеспечены подпиткой тальми водами со снежников. Около 15% территории занято почвами, относящимися к типам петрозёмов и литозёмов, преимущественно безгумусовых, реже – гумусовых и грубогумусовых. Эти почвы занимают выходы скальных пород, крутые склоны, отдельные останцы.

В почвенном покрове также представлены почвы глеевого и аллювиального ряда (вдоль крупных водотоков, с периодическим отложением минерального материала), к ним отнесены около 10% площади территории. Безгумусовые литозёмы также широко распространены в зоне отступления ледника и на свежих моренных отложениях. Значительное распространение на ключевом участке имеют почвы, испытывающие постоянный привнос орнитогенного и прочего зоогенного органического материала (около 4% территории). При проведении исследований обнаружены уникальные для данной территории мерзлотные почвы органогенного ствола с мощностью торфяной толщи более 1,5 м. Почвы, подверженные антропогенному влиянию, широко представлены на территории оазиса, где расположены четыре крупных круглогодичных научных станции, а также аэродром. Около 4% площади почв изучаемой территории несут в себе следы механического и/или химического антропогенного воздействия.

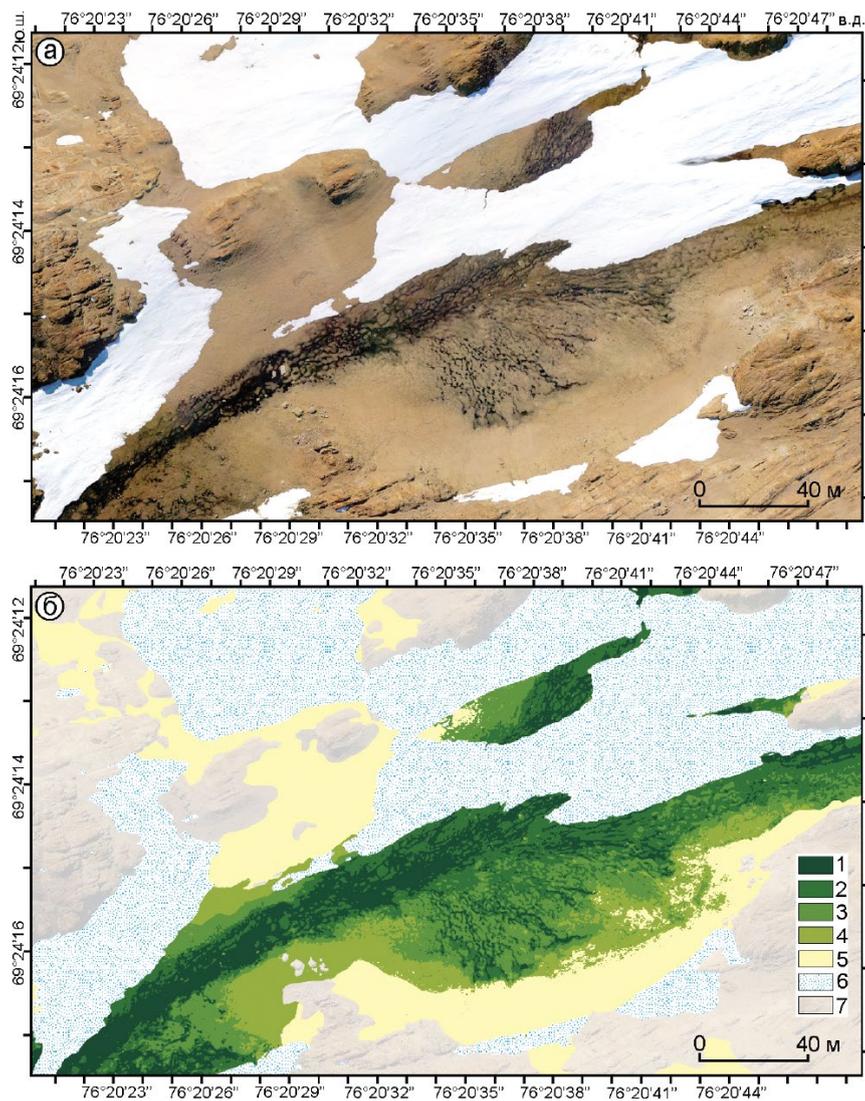
**Почвенный покров среднеантарктической снежниковой криптогамной пустоши на примере оазиса Холмы Ларсеманн.** Почвенный покров оазиса Холмы Ларсеманн – один из самых развитых в Восточной Антарктиде. Четверть его территории занимают межгорные



долины, в которых преобладают мерзлотные песчаные и мелкозёмисто-щебнистые почвы, часто криотурбированные; их ближайшими аналогами служат псаммозёмы и петрозёмы, относящиеся к стволу первичного почвообразования (Классификация и диагностика почв...,

**Рис. 5.** Почвенный покров п-ова Файлдс, о. Кинг-Джордж. Почвы и их комбинации: 1 – псаммозёмы криотурбированные без макроскопических органических горизонтов + криозёмы; 2 – криозёмы + литозёмы; 3 – псаммозёмы мерзлотные + литозёмы; 4 – криозёмы; 5 – литозёмы мерзлотные; 6 – литозёмы мерзлотные + криозёмы; 7 – петрозёмы мерзлотные; 8 – литозёмы + криозёмы; 9 – петрозёмы + скальные выходы; 10 – литозёмы + петрозёмы; 11 – петрозёмы; 12 – почвы маршей; 13 – торфяные мерзлотные; 14 – орнитогенные мерзлотные почвы; 15 – литозёмы слабо орнитогенные; 16 – грунты под дорогами и станциями; 17 – грунты под аэродромом; 18 – токсические грунты под воздействием нефтепродуктов; 19 – грунты под свалками

2004). Орнитогенные почвы занимают незначительные площади. На периодически затопляемых берегах озёр и в тальвегах некоторых долин представлены амфибиальные разности, испытывающие чередование субкавальных и субаэральных обстановок. Почвы Холмов Ларсеманн, как и других оазисов Восточной Антарктиды, формируются при полном отсутствии растений с корневыми системами и, соответственно ризосферы, а их органические горизонты создаются при участии микробных и криптогамных автотрофов. Такие горизонты, как правило, имеют мощность в пределах нескольких сантиметров и занимают эпизодафические (напочвенные подстильно-торфяные горизонты с преобладанием мхов и лишайников) или скрытые гиполитные ниши (горизонты под каменной мостовой с преобладанием цианобактерий, лишайников и иногда мхов). Часто макроскопические органические горизонты вообще не формируются, образуются так называемые «безгумусовые» почвы. В наиболее богатых с точки зрения био- и педоразнообразия долинах площадь выделов почв без макроскопических органических горизонтов может уступать площади всех остальных почвенных разностей, имеющих органические горизонты. Однако в большинстве межгорных долин ситуация обратная. Кроме того, три четверти территории Холмов Ларсеманн составляют выходы коренных пород и скопления крупнообломочного материала, на которых развиты лишь эпилитные и эндолитные почвоподобные образования. Таким образом, почвенный покров Холмов Ларсеманн имеет специфическую для Антарктиды структуру, которая представлена «островами» псаммозёмов и петрозёмов с поверхностными (эпизодафическими) и скрытыми под каменными мостовыми (гиполитными) органическими горизонтами, а также орнитогенными и амфибиальными разностями, расположенными среди крупных ареалов почв без макроскопических органических горизонтов и выходов коренных пород.

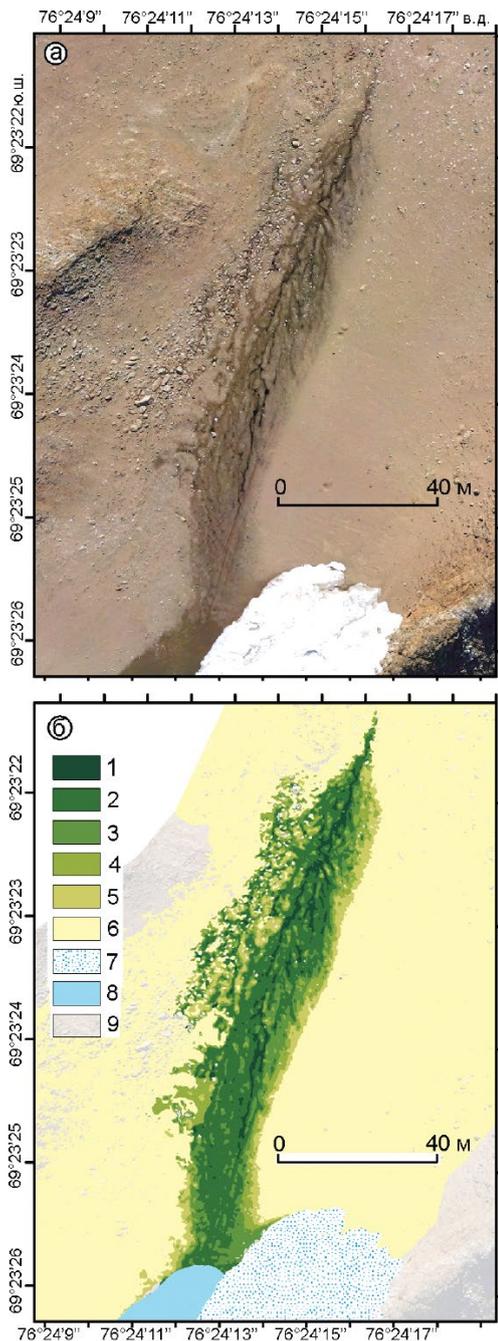


Главным локальным фактором, определяющим структуру биотических комплексов и почвенного покрова в межгорных долинах на фоне низкого литологического разнообразия является рельеф, который создаёт ветровые тени, способствует образованию многолетних снежников (сезонных источников воды) и перераспределяет влагу. Именно от распределения талых вод по мезо- и микрорельефу

**Рис. 6.** Карта-схема почвенного покрова ключевого участка (долина 1 – 69°24.25' ю.ш.; 76°20.60' в.д.) в оазисе Холмы Ларсеманн (по материалам Mergelov et al., 2020): (а) ортофотоплан; (б) структура почвенного покрова: 1 – псаммозёмы с субаквальными/амфибиальными альгобактериальными органогенными горизонтами (70%) и псаммозёмы с эпиэдафическими органогенными горизонтами с доминированием мхов (30%); 2 – псаммозёмы с гиполитными и эпиэдафическими органогенными горизонтами с доминированием мхов; 3 – псаммозёмы с гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий на полигонах и эпиэдафическими органогенными горизонтами с доминированием мхов по периферии полигонов; 4 – псаммозёмы с гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий; 5 – псаммозёмы и петрозёмы без макроскопических органогенных горизонтов или с эфемерными гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий; 6 – снежники; 7 – скальные обнажения с эндолитными и эпилитными почвоподобными образованиями

зависит на локальном уровне разнообразность органогенных горизонтов: от субаквальных/амфибиальных альгобактериальных матов и субаэральных эпиэдафических горизонтов с доминированием мхов до скрытых под каменной мостовой гиполитных горизонтов с преобладанием цианобактериальных сообществ.

Эта особенность позволила использовать при изучении структуры почвенного покрова межгорных долин оазиса цветковые и яркостные характеристики аэрофотоснимков (сплошной растительный покров отсутствует и при литологической однородности субстрата его оптические свойства коррелируют с влажностью), а также морфометрические показатели рельефа, рассчитанные после фотограмметрической обработки изображений. На основе высокодетальной аэрофотосъёмки в видимом диапазоне, ортофотопланов с разрешением 7 см/пиксель, цифровых моделей рельефа, а также маршрутных полевых исследований были составлены карты-схемы почвенного покрова двух крупных долин оазиса Холмы Ларсеманн. Основные подтиповые различия в рамках псаммозёмов и петрозёмов проводили по специфичным для Восточной Антарктиды особенностям их органогенных горизонтов (см. легенду рис. 6, 7). Результаты детального картографирования показали, что в области рыхлого чехла долин органогенные горизонты почв образуют континуум с регулярным чередованием по элементам микро- и мезорельефа поверхностных и скрытых в минеральной толще разновидностей. Доля почв в общей площади долин (в рамках картографируемых участков) достигала 40–79%, среди них почвы с макроскопическими органогенными горизонтами составляли 22–65% (табл. 2).



**Рис. 7.** Карта-схема почвенного покрова ключевого участка (долина 2 – 69°23.35' ю.ш.; 76°24.02' в.д.) в оазисе Холмы Ларсеман (по материалам Mergelov et al., 2020): а) ортофото-план; б) структура почвенного покрова: 1 – псаммозёмы с субаквальными/амфибиальными альгобактериальными органо-генными горизонтами; 2 – псаммозёмы с субаквальными/амфибиальными альгобактериальными органо-генными горизонтами (50%) и псаммозёмы с эпиэдафическими органо-генными горизонтами с доминированием мхов (50%); 3 – псаммозёмы с гиполитными и эпиэдафическими органо-генными горизонтами с доминированием мхов; 4 – псаммозёмы с гиполитными органо-генными горизонтами с доминированием цианобактерий на полигонах и эпиэдафическими органо-генными горизонтами с доминированием мхов по периферии полигонов; 5 – псаммозёмы с гиполитными органо-генными горизонтами с доминированием цианобактерий; 6 – псаммозёмы и петрозёмы без макроскопических органо-генных горизонтов или с эфемерными гиполитными органо-генными горизонтами с доминированием цианобактерий; 7 – снежник; 8 – талая вода; 9 – скальные обнажения с эндолитными и эпилитными почвоподобными образованиями.

**Таблица 2.** Площадь и структура почвенного покрова в двух долинах оазиса Холмы Ларсеманн.

Почвы	Долина 1		Долина 2	
	площадь, м <sup>2</sup>	площадь, %	площадь, м <sup>2</sup>	площадь, %
Псаммозёмы с субаквальными/амфибиальными альгобактериальными органогенными горизонтами	–	–	172	1,3
Псаммозёмы с субаквальными/амфибиальными альгобактериальными органогенными горизонтами и псаммозёмы с эпиздафическими органогенными горизонтами с доминированием мхов	3487	15,4	1204	8,7
Псаммозёмы с гиполитными и эпиздафическими органогенными горизонтами с доминированием мхов	4606	20,4	683	4,9
Псаммозёмы с гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий на полигонах и эпиздафическими органогенными горизонтами с доминированием мхов по периферии полигонов	3606	15,9	568	4,1
Псаммозёмы с гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий	2977	13,2	408	3,0
Псаммозёмы и петрозёмы без макроскопических органогенных горизонтов или с эфемерными гиполитными органогенными горизонтами с доминированием цианобактерий	7945	35,1	10762	78,0
<b>Всего почв</b>	<b>22621</b>	<b>100,0</b>	<b>13797</b>	<b>100,0</b>
Доля почв на ключевом участке	–	40,2	–	79,3
Скальные обнажения и крупнообломочный материал	14082	25,0	2329	13,4
Снежники	19529	34,8	1032	5,9
Талые воды	–	–	233	1,3
<b>Ключевой участок</b>	<b>56232</b>	<b>100,0</b>	<b>17391</b>	<b>100,0</b>

*Почвенный покров переходного варианта между холодными пустынями и криптогамными пустошами - оазис Холмы Бангера.* Оазис Холмы Бангера – второй по величине после Сухих долин и имеет площадь около 900 км<sup>2</sup>. Он характеризуется сходными климатическими факторами и условиями как с береговыми (Холмы Ларсеманн, Холмы Тала), так и с зашельфовыми (Ширмахера) оазисами. Несмотря на большую площадь, продолжительный тёплый период (более двух месяцев) и выраженный внутриоазисный эффект, приводящий к формированию кучевой облачности, жидкие осадки здесь не выпадают. Длительное развитие оазиса в перигляциальной зоне привело к формированию крупных ровных поверхностей межгрядовых долин и межсочных котловин, из которых активно выдувается свежавывающий снег. Кроме

того, для таких долин и котловин характерно широкое распространение морен с высокой долей щебня и крупнообломочного материала. Это приводит к ещё более сильному дефициту жидкой влаги в летний период в верхних нескольких сантиметрах почв и меньшей площади увлажняемых поверхностей, по сравнению с оазисами Холмы Ларсеманн и Холмы Тала. Отсутствие колоний пингвинов и в связи с этим небольшие популяции южнополярного поморника и снежного буревестника обуславливают крайне незначительный орнитогенный перенос органического вещества. Лишь локально в небольших укрытиях обнаруживаются скопления орнитогенного материала.

Важная геохимическая особенность оазиса – обширное распространение на поверхности почв солевых мелкокристаллических инкрустаций двух групп: карбонатно-хлоридно-сульфатного и преимущественного карбонатного состава. Для низких голоценовых (до 20 м над ур. моря) и ряда плейстоценовых морских террас (до 40 м) характерны поверхностные инкрустации легкорастворимых солей преимущественно гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатного состава, большая часть которых имеет морскую природу. Для плоских плакорных поверхностей высоких (до 80 м) моренных плато центральной части оазиса характерно преимущественно карбонатное поверхностное засоление, причём легкорастворимые карбонатные соли преобладают над труднорастворимыми. Высокий гипсометрический уровень, повышенная компакция и высокая степень выветрелости приповерхностного моренного материала, а также слабая эрозионная расчленённость моренных плато и котловин позволяют объяснить карбонатное засоление продолжительным выветриванием массивно-кристаллических и рыхлых пород оазиса.

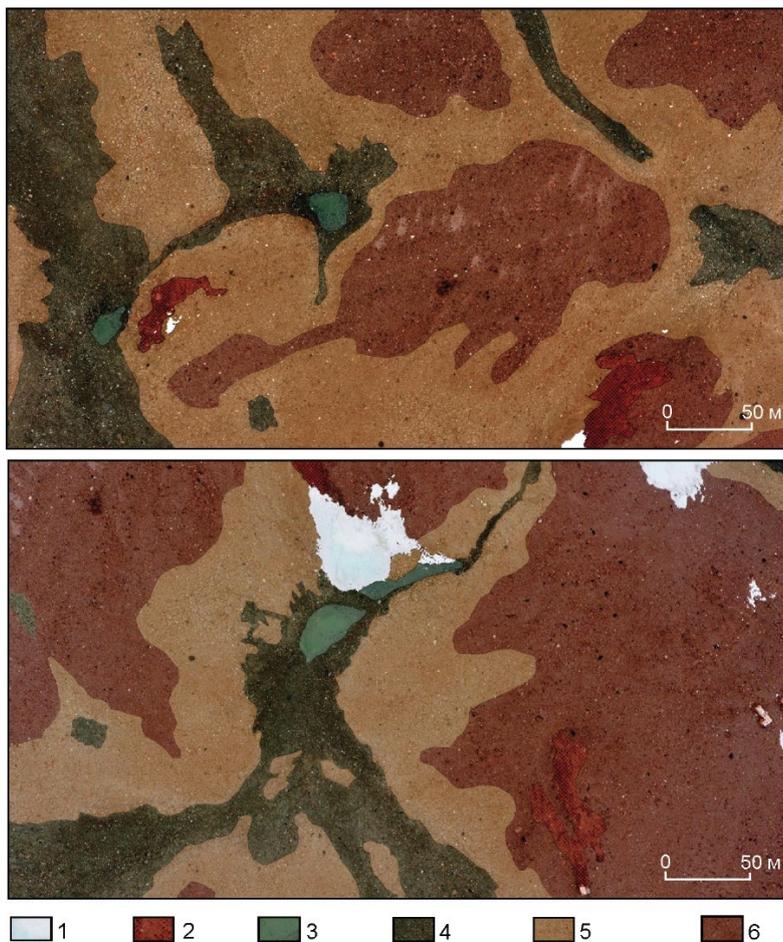
Почвенный покров Холмов Бангера имеет мозаичное строение, которое определяется не широтой и удалённостью от океана или ледника, а локальными условиями (геоморфологическое положение, размер форм мезорельефа, наличие ветровой тени, латеральный сток влаги, гранулометрический состав материнских пород, количество грубообломочного материала, дренаж талых вод снежников в верхних 5 см). Почвенный покров представлен преимущественно пелозёмами, относящимися к стволу первичного почвообразования (Классификация и диагностика почв..., 2004), а именно: ташетами пелозёмов с эпиэдафическим альго-бактериальным горизонтом в центральной части мерзлотных полигонов и эпиэдафическим горизонтом с доминированием мхов по периферии полигонов; пелозёмами с поверхностным солевым инкрустационным го-

ризонтом (карбонатно-хлоридно-сульфатным) на склонах и придонных поверхностях мелких линейных бессточных долин и замкнутых изометричных котловин; мозаиками пелозёмов и криометаморфических криотурбированных почв с поверхностным инкрустационным солевым горизонтом (преимущественно карбонатным) на плакорных поверхностях (рис. 8). Гиполитные органогенные горизонты в отличие от оазиса Холмы Ларсеманн встречаются крайне редко, что связано с преимущественно суглинистым составом рыхлых пород и их тёмным цветом. Наиболее развитые почвы (литозёмы перегнойные и торфяно-литозёмы) располагаются в ветровых убежищах и формируются в локально благоприятных гидрологических условиях под мощными моховыми покровами. Однако такие почвы занимают менее 0,1% территории оазиса.

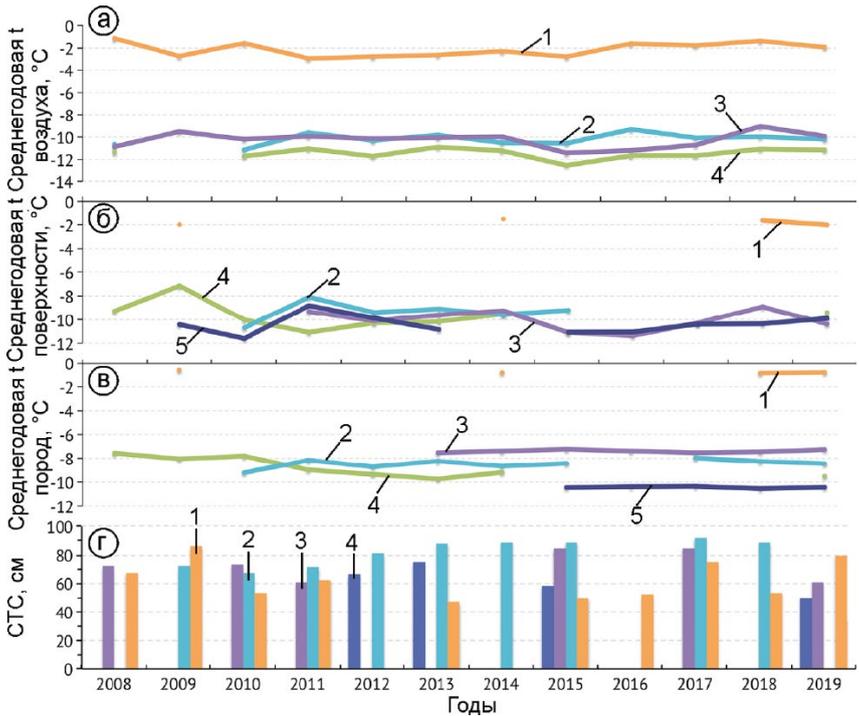
### **Промежуточные итоги мониторинга динамики глубины деятельного слоя и температурного режима многолетнемёрзлых пород**

Начиная с 53 РАЭ (2007–2008) геокриологические исследования систематически проводятся сотрудниками ИФХиБПП и ИГ РАН. Сформированная мониторинговая сеть состоит из пяти скважин и более десятка пунктов температурного мониторинга на поверхности пород и в деятельном слое. Наблюдения за динамикой глубины сезонного оттаивания ведутся на четырёх площадках. За это время изменения температур на уровне глубин нулевых годовых амплитуд не вышли за 0,2–0,3 °С (отметим, что только две глубоких скважины имеют ряды наблюдений более 5 лет) (рис. 9). Межгодовая изменчивость средних показателей температуры деятельного слоя выше, при этом характер изменений не носит однозначной направленности. Заметное понижение температуры пород в оазисе Бангера связано с формированием в 2012–2013 гг. многолетнего снежника над скважиной. Понижились температуры пород и на о. Кинг-Джордж, что может быть связано с холодным периодом в 2011–2015 гг. Глубина сезонного оттаивания зависит от среднелетних температур, повышенное снегонакопление приводит к уменьшению средних значений за счёт отсутствия протаивания под снежниками.

На всех свободных от ледяного покрова участках Антарктиды (0,22% территории, или 30900 км<sup>2</sup>) распространены многолетнемёрзлые породы (за исключением районов проявления активного вулканизма и глубоких озёр). Преобладает сплошное их распространение, с близкими к нулю значениями среднегодовых температур пород и мощно-



**Рис. 8.** Карты-схемы почвенного покрова центральной части оазиса Холмы Бангера: 1 – снежники; 2 – экспонированные массивно-кристаллические породы с эндо- и эпиплитными почвоподобными образованиями и фрагментами горизонтов красноцветного профиля выветривания; 3 – периодически пересыхающие водоёмы: суббавальные/амфибиальные разности и пелозёмы с горизонтами альгобактериальных матов; 4 – ташеты пелозёмов с эпиэдафическими альгобактериальными горизонтами в центральной части полигонов и эпиэдафическими горизонтами с доминированием мхов по периферии полигонов; 5 – склоны и придонные поверхности мелких линейных бессточных долин и замкнутых изометричных котловин: пелозёмы с поверхностным солевым инкрустационным горизонтом (карбонатно-хлоридно-сульфатным); 6 – плакорные поверхности: мозаики пелозёмов и криометаморфических криотурбированных почв с поверхностным инкрустационным солевым горизонтом (преимущественно карбонатным)



**Рис. 9.** Динамика температурного режима и глубин сезонного оттаивания: а – среднегодовая температура воздуха на станциях 1) Беллинсгаузен, 2) Новолазаревская, 3) Дэйвис, 4) Мирный; б – среднегодовая температура поверхности в районе 1) о. Кинг-Джордж, 2) оазис Ширмахера, 3) оазис Холмы Ларсеманн, 4) оазис Холмы Бангера, 5) мыс Беркс; в – среднегодовая температура пород по скважинам (глубина замера): 1) о. Кинг-Джордж (10 м), 2) оазис Ширмахера (3 м), 3) оазис Холмы Ларсеманна (15 м), 4) оазис Холмы Бангера (7 м), 5) мыс Беркс (12 м); г – среднегодовая глубина сезонного оттаивания (или мощность сезонно-талого слоя): 1) о. Кинг-Джордж, 2) оазис Ширмахера, 3) оазис Холмы Ларсеманна, 4) оазис Холмы Тала

стями в десятки метров на побережье субантарктических островов, и достигающими  $-36^{\circ}\text{C}$  и сотен метров в хребтах Трансантарктических гор. Прибрежные районы, где расположена основная часть российских станций, характеризуется сплошным распространением многолетне-мёрзлых пород с среднегодовыми температурами около  $-7...-11^{\circ}\text{C}$  и глубиной сезонного оттаивания 0,2–1,2 м (Obu et al., 2020).

В антарктических оазисах широко распространены проявления криогенных процессов – сортировки, пучения, солифлюкции.

## **Некоторые аспекты антропогенного воздействия на почвы**

Антропогенные объекты и сооружения занимают от 10–15% (станция Прогресс-2, Новолазаревская) до 80% (обсерватория Мирный) свободной ото льда территории оазисов, а зона активного влияния человека часто перекрывает всю их площадь. Интенсивность антропогенного воздействия хорошо иллюстрирует общепринятый показатель "плотности населения": в пересчете на площадь оазисов и нунатаков в отдельные летние сезоны он может составлять от 24 чел/км<sup>2</sup> (станция Прогресс-2) до 300 чел/км<sup>2</sup> (обсерватория Мирный), что сравнимо с плотностью населения США, Китая или стран Западной Европы – и это только учёт численности состава российских станций (на территории одного оазиса могут одновременно базироваться от 2–4 (оазис Холмы Ларсеманн, оазис Ширмахера) до 7 (о. Кинг-Джордж) научных станций различных государств).

Почвы, подверженные антропогенному воздействию, содержат 40–50, а порой и до 70% мелкозёма. Несмотря на слабое оструктурирование и агрегирование материала, загрязняющие вещества способны аккумулироваться на поверхностях отдельных частиц и зёрен, где широко распространены плёнки вторичных минералов (показатель гигроскопической влажности достигает 3–7%, в отличие от 0,5–1% в ненарушенных почвах).

Текущие исследования содержания углеводов нефти и её производных антропогенного происхождения (УВН) совместно с природными органическими углеводородами (ОУВ) в почвах и грунтах оазисов Антарктиды (УВН+ОУВ) показали, что местообитания, незатронутые антропогенной деятельностью, могут содержать от 40–60 до 120–140 (в реголитах – продукт выветривания массивных горных пород без растительного покрова), а иногда и 250–300 мг/кг (в почвах с развитым органомным профилем) (Aislabie et al., 1999). При этом один из важнейших показателей биологического потенциала почв – количество органического углерода – также может варьировать в пределах от 0,3–0,5 до 1,5% в реголитах и антропогенно нарушенных грунтах до 2–4 и достигать 8–14% в верхних органомных горизонтах почв. На данном этапе исследований трудно определить абсолютную долю УВН антропогенного происхождения в данном суммарном показателе. Но по косвенным признакам (отношению содержания  $C_{\text{орг}}$  к валовому содержанию УВН+ОУВ) можно предположить, что значимыми для антарктических почв показателями загрязнения является валовое содержание УВН+ОУВ более 100–150 мг/кг для реголитов, лишённых растительного покрова и более

**Таблица 3.** Содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ), углеводов нефти антропогенного происхождения (УВН) и природных органических углеводов (ОУВ) в поверхностных горизонтах почв и грунтов (0-10 см)

Образец	Станция	Индекс	УВН+ОУВ мг/кг	$C_{орг}$	pH водн.
Фоновые почвы	Новолазаревская	NI-01	192,4	0,41	6,86
		NI-03	120,2	2,75	6,74
		NI-04	356,7	1,13	6,62
		NI-06	227,7	0,98	7,09
	Беллинсгаузен	BI-03	333,3	4,10	5,76
Антропогенно нарушенные почвы	Новолазаревская	NI-09 1	<b>415,8</b>	0,24	7,17
		NI-09 2	<b>573,7</b>	0,24	6,88
		NI-09 3	<b>1402,4</b>	2,04	6,49
	Беллинсгаузен	BI-04 1	<b>678,5</b>	0,56	7,58
		BI-04 2	<b>1834,8</b>	0,72	6,97
	Русская	Rs-04	<b>2205,9</b>	1,77	4,98

250–300 мг/кг – для почв с развитым наземным растительным покровом или поверхностными орнитогенными отложениями (табл. 3).

Почвы и грунты под линейными объектами и вблизи нефтебаз накапливают также УВН – от 150 до 600, а в локальных случаях 2200 мг/кг и более, что соответствует среднему и высокому уровням загрязнения при фоновой концентрации – 40–60 мг/кг. Почвы, подвергшиеся антропогенному влиянию, содержат в 3–10 раз больше As, Pb, Cd и Cs, чем их фоновые аналоги.

Ряд  $CO_3$  – пестицидов, гербицидов и их метаболитов обнаружен в представленных образцах (табл. 4). Во всех пробах присутствует гексахлорбензол. Присутствие повышенных доз ДДТ и чрезвычайно высокое содержание его метаболитов, в частности 4,4'-ДДЕ, в животных тканях, обнаруженных на поверхности органогенных горизонтов почв, свидетельствует о том, что не происходит снижение уровня этого химиката в экосистемах Антарктики. Присутствие инсектицида «Мирекс» в животных тканях и отсутствие его в других образцах может быть связано с поступлением в организм птиц по трофическим цепям.

Мхи и лишайники, имеющие развитую поверхность, обычно относят к индикаторам атмосферного загрязнения (Thomas et al., 1985; Borghini et al., 2005). Отсутствие у низших растений корневой системы и преобладание аэриального поступления вещества в процессе питания позволяет считать их аккумуляторами атмосферных аэрозолей, содержащих загрязняющие вещества. В материале поверхностно органогенного горизонта

**Таблица 4.** Содержание стойких органических загрязнителей в поверхностных горизонтах почв и грунтов (0–10 см).

Определяемое соединение, мкг/кг сухого веса	Материал образца				
	№1 животные ткани (Новолазаревская)	№ 2	№ 3	№ 4	№ 6 органогенный горизонт (Русская)
ГХБ	<b>166,42</b>	<b>1,25</b>	<b>1,07</b>	<b>0,30</b>	<b>1,54</b>
β-ГХЦГ	<b>6,62</b>	<0,05*	<0,05	<0,05	<0,05
Гептахлор эпиксид	<b>0,919</b>	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Оксихлордан	<b>30,87</b>	<0,08	<b>0,73</b>	<0,08	<0,08
<i>trans</i> -Хлордан	<b>2,66</b>	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
<i>trans</i> -Нонахлор	<b>12,87</b>	<0,01	<b>0,14</b>	<0,01	<0,01
2.4'-ДДЕ	<b>1,64</b>	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
4.4'-ДДЕ	<b>265,60</b>	<0,03	<b>2,16</b>	<0,03	<b>0,13</b>
4.4'-ДДД	<b>5,66</b>	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
2.4'-ДДТ	<b>1,16</b>	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
4.4'-ДДТ	<b>13,40</b>	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
Дильдрин	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<b>1,87</b>
Мирекс	<b>33,48</b>	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
C <sub>орг</sub>	н.о.	16,56	3,14	19,12	8,64
pH водн.	н.о.	6,76	6,27	5,60	5,01

\*Ниже уровня определения.

(моховая подушка) присутствуют только пентахлорбифенилы № 87 и 118. Наличие в нём ПХБ связано с планетарным трансграничным переносом. Фоновые уровни ПХБ в атмосферных осадках над Антарктидой 0,2 нг/л, в атмосферном воздухе 0,1 нг/м<sup>3</sup> (Клюев, Бродский, 2001).

### Заключение

За последние несколько десятилетий авторским коллективом был пройден непростой путь от признания научным сообществом того, что в Антарктиде, как и в любом другом уголке земного шара, способны протекать процессы почвообразования, до эмпирического подтверждения ведущей роли почв в биогеохимических процессах на лишённых ледникового покрова участках континента. Установлено, что здесь развиваются как общеизвестные, так и уникальные почвенные разности, формируются специфические по строению почвенные покровы. Практически во всех оазисах и даже на отдельно стоящих нунатаках обнаружены почвы или, как минимум, почвоподобные образования.

Особенности строения антарктических почв и почвенных покровов во многом связаны с региональной спецификой воздействия ряда факторов почвообразования, которые определяют облик педосферы на других континентах, или с экстремальным проявлением отдельных из них. За исключением Антарктического полуострова в континентальной Антарктиде нет сосудистых растений, а значит, отсутствует такой важный агент почвообразования как корневые системы. Ризоиды мхов проникают на небольшую глубину и уступают по почвообразующему потенциалу корневым системам. Микробные сообщества могут радикально менять геохимическую обстановку, запускать и ускорять процессы выветривания и почвообразования в антарктических оазисах, но, как правило, локально – в пределах тонкой плёнки, окружающей зерна минералов. Однако ни отсутствие осадков в жидкой форме и сублимация выпадающего снега, ни экстремально низкие температуры и их колебания, ни ультрафиолетовая «стерилизация» открытых поверхностей, ни катастрофические явления, например, кatabатические ветры, которые могут моментально «стереть» то, что было кропотливо «наработано» наземной экосистемой оазиса, не способны полностью остановить протекание почвенных процессов.

Почвоподобные образования самых холодных и удалённых выходов горных пород Антарктиды, даже расположенные в глубине ледникового покрова континента, служат местообитанием для микробных сообществ, содержат в небольших количествах органический углерод, иногда доступные формы азота, имеют признаки биохимического преобразования минеральной массы, стратифицированы на микрогоризонты, и являются основой для функционирования самых экстремальных вариантов «островных» экосистем на свободных ото льда территориях континента. В олиготрофных ландшафтах антарктических оазисов значительную «помощь» почвообразованию оказывает перенос вещества из морских и/или озёрных экосистем и его перераспределение в субэкральных условиях посредством птиц или ветра. Наличие ветровой тени в сочетании с умеренным снегонакоплением, обеспечивающим снабжение талой водой в летний период, способны создавать локальные условия для реализации наиболее продвинутых форм почвообразования.

Коллектив авторов видит важнейшую необходимость продолжения почвенно-мерзлотных исследований на ледовом континенте не только в связи с расширением границ познания отдельных сфер наук о жизни и Земле, но и в условиях современных климатических изменений, затрагивающих в том числе и Антарктический регион. Рост среднегодовых темпе-

ратур воздуха приводит к довольно интенсивной дегляциации (особенно в маритимных районах Антарктики) и, в свою очередь, высвобождает новые территории для колонизации растительным и животным миром, а значит – и для расширения сферы педогенеза на шестом континенте.

## Литература

- Абакумов Е.В.* Гранулометрический состав почв Западной Антарктики // Почвоведение. 2010. № 3. С. 324–332.
- Абакумов Е.В.* Почвы Западной Антарктики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2011. 112 с.
- Абакумов Е.В., Гагарина Э.И., Сапега В.Ф., Власов Д.Ю.* Микроморфологическая характеристика мелкозема и скелета почв Западной Антарктики (районы расположения российских станций) // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1464–1474.
- Абакумов Е.В., Крыленков В.А.* Почвы Антарктиды // Природа. 2011. № 3. С. 58–62.
- Абакумов Е.В., Помелов В.Н., Власов Д.Ю., Крыленков В.А.* Морфологическая организация почв Западной Антарктики // Вест. Санкт-Петербургского ун-та. 2008. Сер. 3. Вып. 3. С. 102–116.
- Абрамов А.А., Слеттен Р.С., Ривкина Е.М., Миронов В.А., Гиличинский Д.А.* Геокриологические условия Антарктиды // Криосфера Земли. 2011. № 3. С. 3–19.
- Александров М.В.* Ландшафтная структура и картирование оазисов Земли Эндерби. Л., Гидрометеиздат. 1985. 152 с.
- Власов Д.Ю., Абакумов Е.В., Надпорожская М.А., Ковш Н.В., Крыленков В., Лукин В.В., Сафронова Е.В.* Литоземы острова Кинг-Джордж, Западная Антарктика // Почвоведение. 2005. № 7. С. 773–781.
- Глазовская М.А.* Выветривание и первичное почвообразование в Антарктиде // Научные доклады высшей школы. Геол.-геогр. науки. 1958. № 1. С. 63–76.
- Глазовская М.А.* Биогеохимическое выветривание вулканических пород андезитового состава в субантарктических перигляциальных условиях // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 3. С. 39–48.
- Горячкин С.В., Блюме Г.-П., Бейер Л., Караваева Н.А., Таргульян В.О., Тарнокаи Ч.* Зональность почв в Арктике и Антарктике: сходство и различия // Материалы междунар. конф. «Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения». Пуццино. 2003. С. 26–27.

- Горячкин С.В., Гиличинский Д.А., Абакумов Е.В., Зазовская Э.П., Мергелов Н.С., Федоров-Давыдов Д.Г.* Почвы Антарктиды: разнообразие, география, генезис (по исследованию районов Российских станций) // Разнообразие мерзлотных и сезонно-промерзающих почв и их роль в экосистемах. Материалы V междунар. конф. по криопедологии Улан-Удэ, Бурятия, Российская Федерация, 14–20 сентября 2009. Москва–Улан-Удэ, 2009. С. 32.
- Горячкин С.В., Гиличинский Д.А., Мергелов Н.С., Конюшков Д.Е., Лупачев А.В., Абрамов А.А., Зазовская Э.П., Долгих А.В.* Почвы Антарктиды: первые итоги, проблемы и перспективы исследований // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию со дня рождения М.А. Глазовской). М., Изд-во МГУ. 2012. С. 361–388.
- Иванов А.Н., Авессаломова И.А.* Орнитогенные экосистемы: геохимические феномены биосферы // Биосфера. 2012. № 4. С. 385–396.
- Карелин Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В., Лунин В.Н., Кудиков А.В.* Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1354–1366.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Клюев Н.А., Бродский Е.С.* Определение полихлорированных бифенилов в окружающей среде и биоте // Полихлорированные бифенилы – супертоксиканты XXI века. Информац. вып. № 5. М., 2000. С. 31–63.
- Лупачев А.В., Абакумов Е.В.* Почвы Земли Мэри Бэрд (Западная Антарктика) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1167–1180.
- Марков К.К., Бардин В.И., Лебедев В.Л., Орлов А.И., Суетова И.А.* География Антарктиды. М., Мысль. 1968. 440 с.
- Мергелов Н.С.* Почвы влажных долин в оазисах Ларсеманн и Вестфолль (Земля принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1027–1045.
- Мергелов Н.С., Горячкин С.В.* Почвы и почвоподобные тела Антарктиды (оазис «Холмы Ларсеманна») // Генезис, география, классификация почв и оценка почвенных ресурсов. Мат-лы науч. конф., посвящ. 150-летию со дня рождения Н.М. Сибирцева. VIII Сибирцевские чтения. Архангельск, 2010. С. 38–42.
- 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.

- Мергелов Н.С., Долгих А.В., Зазовская Э.П., Конюшков Д.Е., Лупачев А.В., Федоров-Давыдов Д.Г., Шишков В.А., Шоркунов И.Г., Горячкин С.В. Почвы и почвоподобные тела оазисов и нунатаков Восточной Антарктиды // Вопросы географии. 2016. Т. 142. С. 593–628.
- Никитин Д.А., Лысак Л.В., Мергелов Н.С., Долгих А.В., Зазовская Э.П., Горячкин С.В. Микробная биомасса, запасы углерода и эмиссия CO<sub>2</sub> в почвах Земли Франца-Иосифа: высокоарктические тундры или полярные пустыни? // Почвоведение. 2020. № 4. С. 444–462.
- Парникоза И.Ю., Абакумов Е.В., Дикий И.В., Пилипенко Д.В., Швидун П.П., Козерецкая И.А., Кунах В.А. Влияние птиц на пространственное распределение *Deschampsia antarctica* Desv. острова Галиндес (Аргентинские острова, Прибрежная Антарктика) // Вест. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 3: Биология. 2015. № 1. С. 78–97.
- Симонов И.А. Оазисы Восточной Антарктиды. Л., Гидрометеоиздат. 1971. 176 с.
- Сыроечковский Е.Е. Роль животных в образовании первичных почв в условиях приполярной области Земного Шара (на примере Антарктики) // Зоологич. журнал. 1959. Т. XXXVIII. Вып. 12. С. 1770–1775.
- Abakumov E.V., Parnikozha I.Y., Vlasov D.Y., Lupachev A.V. Biogenic-abiogenic interaction in antarctic ornithogenic soils // Lecture Notes in Earth System Sciences. 2016. P. 237–248.
- Aislabie J., Balks M., Astori N., Stevenson G., Symons R. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fuel-oil contaminated soils, Antarctica // Chemosphere. 1999. V. 39. № 13. P. 2201–2207.
- Barrett J.E., Virginia R.A., Parsons A.N., Wall D.H. Soil carbon turnover in the McMurdo dry valleys, Antarctica // Soil Biology and Biochemistry. 2006. V. 38. № 10. P. 3065–3082.
- Burkins M.B., Virginia R.A., Wall D.H. Organic carbon cycling in Taylor Valley, Antarctica: quantifying soil reservoirs and soil respiration // Global Change Biology. 2001. V. 7. № 1. P. 113–125.
- Beyer L, Boelter M. (eds.) Geocology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes. Springer. 2002. 427 p.
- Blakemore L.C., Swindale L.D. Chemistry and clay mineralogy of a soil sample from Antarctica // Nature. 1958. T. 182. P. 47–48.
- Bockheim J.G. Landform and soil development in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica: a regional synthesis // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2002. V. 34. № 3. P. 308–317.

- Bockheim J.G.* Soil development in the Taylor Valley and McMurdo Sound area // *Antarctic Journ. of the United States*. 1977. V. 12. № 4. P. 105–108.
- Bockheim J.G.* (ed.). *The Soils of Antarctica*. Springer. 2015. 322 p.
- Bockheim J.G., Campbell I.B., McLeod M.* Permafrost distribution and active-layer depths in the McMurdo Dry valleys, Antarctica // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2007. V. 18. № 3. P. 217–227.
- Bockheim J.G., McLeod M.* Soil distribution in the McMurdo dry valleys, Antarctica // *Geoderma*. 2008. V. 144. № 1. P. 43–49.
- Borghini F., Grimalt J.O., Sanchez-Hernandez J.C., Bargagli R.* Organochlorine pollutants in soils and mosses from Victoria Land (Antarctica) // *Chemosphere*. 2005. V. 58. P. 271–278.
- Campbell I.B., Claridge G.G.C.* *Antarctica: soils, weathering processes and environment*. Elsevier. 1987. 406 p.
- Claridge G.G.C.* The clay mineralogy and chemistry of some soils from the Ross Dependency, Antarctica // *New Zealand Journ. of Geology and Geophysics*. 1965. V. 8. P. 186–220.
- Flint E.H., Stout J.D.* Microbiology of some soils from Antarctica // *Nature*. 1960. V. 188. P. 767–708.
- Fountain A.G., Hoffman M., Levy J.S., Nylén T.H., Lyons W.B.* The Hydrology of the McMurdo Dry Valleys, Antarctica, an Energy-Dominated System // 11th Intern. Symposium on Antarctic Earth Sciences. Abstracts. Edinburgh 10–15 July 2011. P. 119.
- Friedmann E.I., Gilichinsky D.A., Wilson G.S., Ostroumov V.E., Vorobyova E.A., Soina V.S., Shcherbakova V.A., Vishnivetskaya T.A., Chanton J.P., Friedmann R.O., McKay C., Rivkina E.* Viable bacteria, methane and high ice content in Antarctic permafrost: relevance to Mars // *Origins of Life and Evolution of Biospheres*. 1996. V. 26. № 3–5. P. 303.
- Gilichinsky D., Abakumov E., Abramov A., Fyodorov-Davydov D., Goryachkin S., Lupachev A., Mergelov N., Zazovskaya E.* Soils of Mid and Low Antarctic: diversity, geography, temperature regime. // Gilkes RJ, Prakongkep N (eds.) *Proc. of the 19th World Congress of Soil Science; Soil Solutions for a Changing World. Symposium WG 1.4. Cold soils in a changing world*, 2010 August 1–6. Brisbane, Australia: IUSS. 2010. P. 32–35.
- Gilichinsky D., Wilson G., Friedmann E.I., McKay C., Sletten R., Rivkina E., Vishnivetskaya T., Erokhina L., Ivanushkina N., Kochkina G., Shcherbakova V., Soina V., Spirina E., Vorobyova E., Fyodorov-Davydov D., Hallet B., Ozerskaya S., Sorokovikov V., Laurinavichyus K., Chanton J., Shatilovich A., Ostroumov V., Tiedje J.* Microbial Populations in Antarctic

- Permafrost: Biodiversity, State, Age, and Implication for Astrobiology // *Astrobiology*. 2007. V. 7. P. 275–311.
- Goryachkin S. Soil geography of Polar Regions in context of global soil pattern // Proc. of the 21st World Congress of Soil Science “Soil Science: beyond food and fuel”. Rio de Janeiro, Brazil, August 12–17, 2018. V. 1. P. 45–46.
- Gregorich E.G., Hopkins D.W., Elberling B., Sparrow A.D., Novis P., Greenfield L.G., Rochette P. Emission of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from lakeshore soils in an Antarctic dry valley // *Soil Biology and Biochemistry*. 2006. V. 38. № 10. P. 3120–3129.
- Jackson M.L., Lee S.Y., Ugolini F.C., Helmke P.L. Age and uranium content of soil mica from Antarctica by the fission particle track replica method // *Soil Science*. 1977. V. 123. P. 241–248.
- Jensen H.I. Report on Antarctic soils // Reports of the Scientific Investigations. Britain Antarctic Expedition 1907–1909. Pt. IV. *Geology* 2. 1916. P. 89–92.
- Kimble J.M. (ed.) *Cryosols. Permafrost-Affected Soils*. Springer. 2004. 726 p.
- Kubiena W.L. Micromorphological investigations of Antarctic soils // *Antarctic Journal*. 1970. V. 5. № 4. P. 105–106.
- McLeod M. Soil and permafrost distribution, soil characterization and soil vulnerability to human foot trampling, Wright Valley, Antarctica. Ph.D. Thesis, University of Waikato, New Zealand. 2012.
- Mergelov N., Mueller C.W., Prater I., Shorkunov I., Dolgikh A., Zazovskaya E., Shishko V., Krupskaya V., Abrosimov K., Cherkinsky A., Goryachkin S. Alteration of rocks by endolithic organisms is one of the pathways for the beginning of soils on Earth // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. № 3367.
- 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 Reports*, 2020, in press.
- Obu J., Westermann S., Vieira G., Abramov A., Balks M.R., Bartsch A., Hrbáček F., Kääb A., Ramos M. Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km<sup>2</sup> scale // *Cryosphere*. 2020. V. 14. P. 497–519.
- Parnikoza I., Abakumov E., Korsun S., Klymenko I., Netsyk M., Kudinova A., Kozeretska I. Soils of the Argentine islands, Antarctica: Diversity and characteristics // *Polarforschung*. 2016. V. 86. № 2. P. 83–96.
- Parsons A.N., Barrett J.E., Wall D.H., Virginia R.A. Soil carbon dioxide flux in Antarctic dry valley ecosystems // *Ecosystems*. 2004. V. 7. P. 286–295.
- Peter H.-U.P. Risk assessment for the Fildes Peninsula and Ardley Island, and development of management plans for their designation as Specially Protected or Specially Managed Areas. Jena. 2008. P. 1–337.

- Simas F.N.B., Schaefer C.E.G.R., Filho M.R.A., Francelino M.R., Filho E.I.F., da Costa L.M.* Genesis, properties and classification of cryosols from Admiralty Bay, maritime Antarctica // *Geoderma*. 2008. V. 144. P. 116–122.
- Simas F.N.B., Shaefer C.E., Melo V.* Clay-sized minerals in permafrost soils (Cryosols) from King George Island, Antarctica // *Clays and Clay Minerals*. 2006. V. 54. P. 721–736.
- Tatur A., Myrcha A.* Soils and vegetation in abandoned penguin rookeries (Maritime Antarctica) // *Proc. NIPR Symposium. Polar Biology*. 1989. V. 2. P. 181–189.
- Tedrow J.C.F.* Soils of polar Landscapes. Rutgers Univ. press. 1977. 664 p.
- Tedrow J.C.F., Ugolini F.C.* Antarctic soils // *Tedrow J.C.F. (Ed.). Antarctic Soils and Soil Forming Processes. Antarctic Research Series. V. 8. Amer. Geophys. Union. Washington, DC, 1966. P. 161–177.*
- Thomas W., Simon H., Ruhling A.* Classification of plant species by their organic (PAH, PCB, HBC) and inorganic (heavy metals) trace pollutant concentrations // *Science of the Total Environment*. 1985. V. 46. P. 83–94.
- Thomazini A., Francelino M.R., Pereira A.B., Schünemann A.L., Mendonça E.S., Almeida P.H.A., Schaefer C.E.G.R.* Geospatial variability of soil CO<sub>2</sub> – C exchange in the main terrestrial ecosystems of Keller Peninsula, Maritime Antarctica // *Science of The Total Environment*. 2016. V. 562. P. 802–811.
- Ugolini F.C., Bull C.* Soil development and glacial events in Antarctica. *Quaternaria* 7, 1965. P. 251–269
- Ugolini F.C., Jackson M.L.* Weathering and mineral synthesis in Antarctic soils. In: *Craddock, C. (Ed.), Antarctic Geoscience. Univ. Wisconsin, Madison, WI, 1982. P. 1101–1111.*
- Vtyurin B.I.* A geocryological account of the Schirmacher Oasis // *Polar Geography and Geology* 1986. V. 10. № 3. P. 200–212.
- Vtyurin B.I., Moskalevskiy M.Yu.* Cryogenic landforms on King George Island, South Shetland Islands // *Polar Geography and Geology*. 1985. V. 9. № 1. P. 62–69.
- Yudakova O.I., Tyrnov V.S., Kunakh V.A., Kozeretskaya I.A., Parnikoza I.Y.* Adaptation of the Seed Reproduction System to Conditions of Maritime Antarctic in *Deschampsia antarctica* E. Desv // *Ontogenez*. 2016. V. 47. № 3. P. 170–180.
- Wilson G., Braddock P., Foreman S., Friedmann E.I., Rivkina E., Chanton J., Gilichinsky D., Fyodorov-Davidov D., Ostroumov V., Sorokovikov V., Wizevich M.* Coring for microbial records of Antarctic climate // *Antarctic Journ. of the United States Review*. 1996. V. 31. № 2. P. 83–84.
- Zazovskaya E., Mergelov N., Shishkov V., Dolgikh A., Miamin V., Cherkinskiy A., Goryachkin S.* Radiocarbon age of soils in oases of East Antarctica // *Radiocarbon*. 2017. V. 59. № 2. P. 489–503.