

УДК 631.46

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ ПОКРОВНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ

© 2021 г. Д. А. Никитин^{a, d, *}, Л. В. Лысак^b, Д. В. Бадмадашиев^b, С. С. Холод^c,
Н. С. Мергелов^d, А. В. Долгих^d, С. В. Горячкин^d

^aПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^cБотанический институт им. В.Л. Комарова РАН, ул. Профессора Попова, 2, Санкт-Петербург, 197376 Россия

^dИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, Москва, 119017 Россия

*e-mail: dimnik90@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

После доработки 16.03.2021 г.

Принята к публикации 27.03.2021 г.

Охарактеризован растительный покров, химические и физические свойства пелоземов сильноскелетных остаточно-карбонатных (Skeletal Leptosols (Loamic)), карбопетроземов (Calcaric Leptosols (Protic)), петроземов (Skeletal Leptosols (Protic)) и криоземов (Oxyaquic Cryosols (Loamic)) северной части архипелага Новая Земля. Определены запасы и структура микробной биомассы, интенсивность эмиссии CO₂ (базальное и субстрат-индуцированное дыхание), CH₄ (метаногенез) и N₂O (денитрификация) в образцах почв указанных территорий. Биомасса микроорганизмов (прокариот и грибов суммарно) варьировала от 22.50 до 390.18 мкг/г (мкгС/г) почвы. Доля микобиоты в микробной биомассе составляла от 80 до 98%. Большая часть микробной биомассы (до 50%) сконцентрирована в поверхностных горизонтах. Численность прокариот колеблется от 1.5×10^7 до 9.66×10^8 кл./г почвы, а биомасса грибов – от 22 до 372 мкг/г почвы. Длина актиномицетного мицелия мала от 0.6 до 23.5 м/г почвы, а грибных гиф на порядок больше (до 166 м/г почвы). Все параметры биологической активности изученных почв резко уменьшаются вниз по профилю, что положительно коррелирует с содержанием органического вещества, углерода и азота. В целом значения изученных показателей биологической активности почв севера Новой Земли меньше, чем в почвах расположенной на 3°–5° севернее Земли Франца-Иосифа. Этот феномен связан с влиянием самого крупного в России ледника на почвенно-растительный покров прилегающей территории.

Ключевые слова: Арктика, экстремальные экосистемы, перигляциальная зона ледника, биомасса микроорганизмов, прокариоты, грибы, базальное дыхание, субстрат-индуцированное дыхание, метаногенез, денитрификация

DOI: 10.31857/S0032180X21100087

ВВЕДЕНИЕ

Комплексное изучение биологических свойств почв полярных регионов является одним из наиболее актуальных направлений современной микробиологии [47]. Относительно хорошо исследовано таксономическое разнообразие прокариот и микробиоты арктических территорий [60, 62, 77]. Однако практически неизвестны количественные параметры почвенного микробиома Высокой Арктики (численность микроорганизмов, запасы и структура микробной биомассы, уровень базального дыхания, метаногенеза, денитрификации и др.) несмотря на то, что они имеют важное значение для характеристики функционирования экосистем [9, 69, 73]. Биомасса микроорганизмов – важный показатель интенсивности круго-

ворота макроэлементов в почве [73]. Микроорганизмы – наиболее активная и динамичная часть почвенного органического вещества [28], а численные показатели биомассы позволяют оценить степень его трансформации и уровень продуктивности экосистем [79]. Поскольку о Северный находится в зоне чрезвычайно сурового климата и, как следствие, обладает минимальным количеством компонентов биогеоценозов, данный район архипелага является наиболее перспективным для выявления новых фундаментальных закономерностей в экологии почвенных микроорганизмов [44, 52].

Помимо биологического и экологического значения, знание о микробиоме почв полярных областей и его функционировании имеет важное

почвенно-географическое значение, так как при слабой выраженности признаков почвообразовательных процессов в высоких широтах помогает понять процессы почвообразования и роль абиогенных и биогенных факторов в распределении почв и особенностей их функционирования. Имеется опыт использования данных о биологической активности почв для понимания зональности почвенного покрова в Высокой Арктике [21].

Несмотря на относительно небольшую удаленность от цивилизации, природа архипелага Новая Земля (НЗ) во многом остается не исследованной из-за крайне ограниченного доступа на его территорию в связи с наличием здесь полигона для испытаний ядерного оружия. Наиболее полное историческое освещение почвенных исследований на НЗ выполнено ранее [4], но северная часть архипелага оставалась неохваченной. Новый этап исследования физико-географических характеристик архипелага НЗ, в частности его почвенного покрова, стал возможен в последние годы благодаря развитию национального парка “Русская Арктика” и проекта “Арктический плавучий университет” [21, 24]. Это дало возможность ознакомиться с почвенным покровом в районе мыса Желания – около самой северной оконечности о. Северный НЗ [5]. Некоторые краткие исследования почв этого региона проведены геологами и геохимиками [15, 19].

Эти исследования показали, что процессы почвообразования здесь развиты слабо. Большая часть территории занята выходами скал и каменистыми россыпями с эндолитными солоидами (почвоподобными образованиями) [6], отмечено накопление мелкозема на поверхности снежников и ледников [19], что позволяет предположить наличие супрагляциальных солоидов и криоконитов [85]. Среди почв отмечены петроземы и литоземы серогумусные грубогумусированные.

Особенности растительности НЗ отражены в ряде работ, которые проанализированы А.Н. Кулиевым [16], имеются наблюдения по растительности Карского побережья о. Северный НЗ [29]. Все ботаники относят описанные здесь растительные группировки к полярной пустыне и отмечают крайнюю разреженность покрова, за исключением наиболее благоприятных местообитаний.

Информация о микробиоме почв НЗ крайне отрывочна. Впервые его стал изучать А.Ф. Казанский, который считал, что важнейшая роль в биогеохимических циклах высоких широт принадлежит именно микроорганизмам [16]. Имеются скудные сведения о культивируемых бактериях и простейших внутренних водоемов, поверхности растений и грунтов в разрозненных точках архипелага [40, 63], что не дает возможности оценить реальную численность и функциональную роль микроорганизмов [18, 49]. Информация о не-

культивируемых формах, которые составляют до 98% от всех известных микроорганизмов, практически отсутствует [18, 43].

Большая часть работ, посвященных оценке запасов биомассы почвенного микробиома Арктики, проведена классическими методами микробиологии (посевом на разнообразные питательные среды) [37, 42], что не позволяет адекватно определить микробную биомассу. Имеются отдельные работы по определению активности эмиссии CO_2 методом фумигации–экстракции; измерением эмиссии CO_2 , при подавлении активности бактерий [34, 68] и др. Единичные статьи посвящены оценке микробной биомассы в почве методом люминесцентной микроскопии на полуострове Таймыр, Аляске, Канаде и архипелаге Земля Франца-Иосифа [21, 23, 37, 75], но не для территории НЗ.

Основными группами почвенного микробиома являются прокариоты (бактерии и археи) и грибы [8], поэтому важно оценить вклад в биомассу обоих этих компонентов. Прокариоты в отличие от остальных микроорганизмов участвуют во всех этапах круговорота биогенных элементов в природе и являются основным фактором, как формирования органического вещества почвы, так и устойчивости биогеоценозов в целом [8, 56, 78]. Несмотря на то, что численность их клеток достигает нескольких миллиардов на грамм почвы [26], биомасса прокариот обычно невелика и составляет не более 2–5% от общей микробной биомассы. Микобиота – неотъемлемый и важный компонент почв, осуществляющий экологическую функцию редуцентов органического вещества [8, 56]. Благодаря широкому спектру гидролаз, наиболее активных в аэробных условиях, для наземных экосистем вклад грибов в круговорот углерода гораздо больше, чем прокариот [79]. Биомасса грибов может достигать 98% от общей микробной биомассы в почве [8, 23, 26]. Информация об обилии нелихенизированной микобиоты субстратов НЗ ограничивается лишь данными о количестве пропагул культивируемых микроскопических грибов, доля которых в природных сообществах мала [18, 40, 43, 55]. Для оценки вклада микобиоты в интенсивность биогеохимических циклов любой экосистемы необходимо определить соотношение мицелия и спор в почве [14]. Мицелий является вегетативным телом многоклеточных грибов, иногда составляющим до 100% массы организма. Однако в полярных экосистемах доля мицелия может быть очень мала из-за сурового климата [14, 51]. Сведения о длине грибного мицелия и содержании спор в почвах НЗ отсутствуют.

Цель работы – количественная оценка параметров биологической активности почв (интенсивности эмиссии CO_2 , CH_4 и N_2O , определение

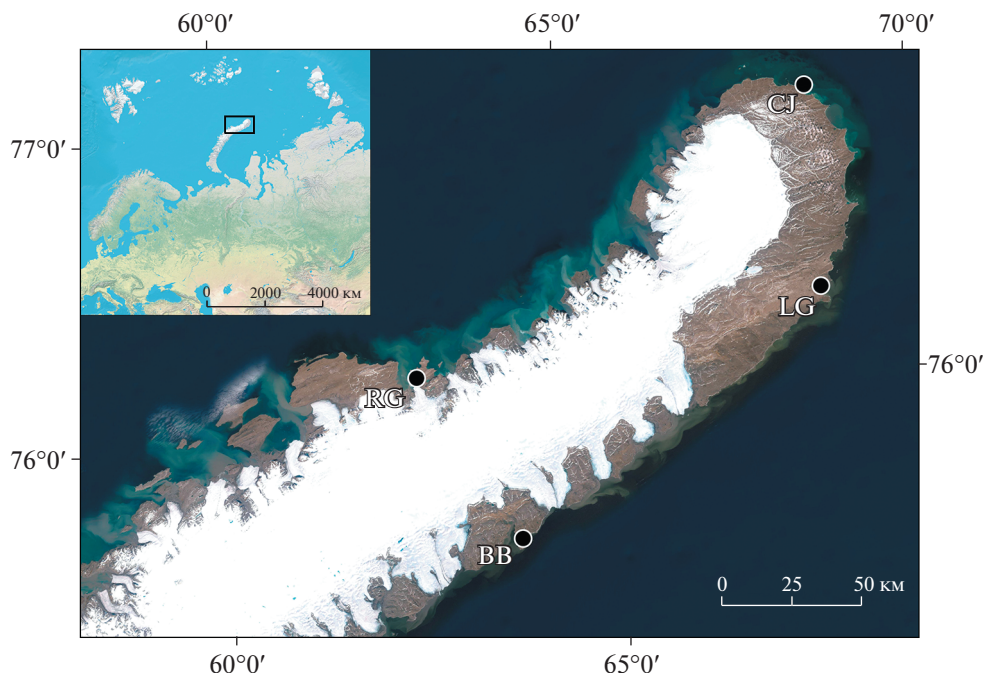


Рис. 1. Объекты исследования. Расположение точек исследования на о. Северный архипелага Новая Земля. RG – Русская Гавань, CJ – мыс Желания, LG – Ледяная Гавань, BB – залив Бухта Благополучия. На рисунке видны: покровный ледник Северного острова и “лопасти” выводных ледников, спускающихся к Баренцеву (на западе) и Карскому (на востоке) морям.

численности клеток и биомассы микроорганизмов) на северной части НЗ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Все объекты исследования расположены на о. Северный архипелага НЗ. Здесь располагается самый большой покровный ледник России, площадь которого оценивается по-разному из-за его динамичности, составляя около 20 тыс. км². От него в сторону Баренцева (на запад) и Карского (на восток) морей спускаются выводные ледники, превращая перигляциальную зону, тянущуюся узкой полосой вдоль берегов, в цепь оазисов [29], подобно тем, которые имеются в Антарктиде (рис. 1). Ледник оказывает охлаждающее и местами иссушающее воздействие на климат из-за стоковых ветров [3, 4], а также на почвообразующие породы, привнеся в современную перигляциальную зону моренный материал, содержащий высокую долю крупнозема.

Поскольку горы НЗ, являющиеся продолжением Уральского хребта, сложены осадочными и метаморфическими породами, то в качестве почвообразующих пород преобладают дериваты карбонатных глинистых сланцев и алевролитов, а также известняков – сильнощелочные, преимущественно, карбонатные суглинки и глины [27].

Климат на севере НЗ – морской арктический, среднегодовые температуры в районе Русской Гавани и мыса Желания – –8 и –10°C соответственно, а средние температуры июля +4.2 и +1.8°C [20]. На Карской стороне метеостанций не было, но из-за большей ледовитости моря летние температуры здесь ниже на 2–3°C, чем на побережье Баренцева моря на той же широте [7]. Характерны относительно обильные осадки (340 в Русской Гавани и 320 мм/год на мысе Желания), большая влажность воздуха, туманы и сильные ветры до 45–55 м/с [7]. Исследования почвенного и растительного покрова в полевых условиях, а также отбор образцов проводили во второй половине июля 2018 г. в ходе экспедиции по проекту “Арктический плавучий университет”. Местоположение точек полевых работ представлено на рис. 1, а фото почвенных разрезов и названия почв – на рис. 2. Названия почв приведены по Классификации и диагностике почв России с учетом интерпретации почв Арктики для классификации [2], а также по международной классификации WRB [54]. Несмотря на то, что район исследований расположен в зоне распространения сплошных многолетнемерзлых пород, высокая щелочность не позволила обнаружить их в большинстве профилей, в связи с чем почвы не были отнесены к мерзлотным (Cryosols), за исключением гидроморфных неглеевых, которые были классифицированы как криоземы [2].

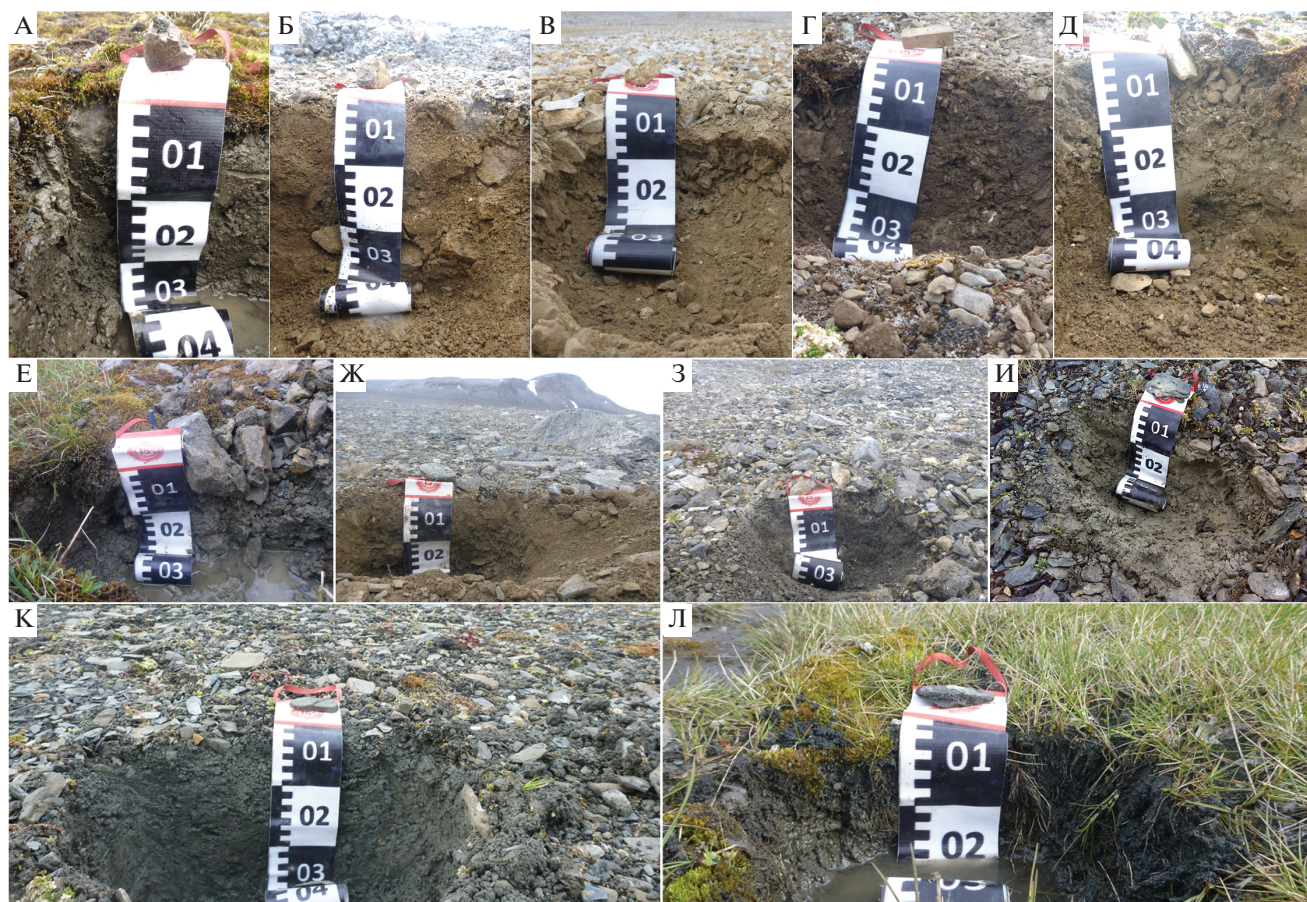


Рис. 2. Исследованные почвы: А – мыс Желания, разрез CJ-22-23, 76.95064° N, 68.52282° E, криозем остаточно-карбонатный сильноскелетный (Skeletal Oxyaquic Cryosol (Loamic, Calcaric)); Б – мыс Желания, разрез CJ-24-25, 76.95493° N, 68.46068° E, петрозем криотурбированный остаточно-карбонатный сильноскелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Protic, Turbic)); В – Ледяная Гавань, разрез LG-11, 76.29833° N, 68.153056° E, карбопетрозем очень сильноскелетный (Calcaric Hyperskeletal Leptosol (Loamic)); Г – Ледяная Гавань, разрез LG-12-14, 76.29750° N, 68.153889° E, пелозем гумусовый криотурбированный остаточно-карбонатный сильноскелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Humic, Turbic)); Д – Ледяная Гавань, разрез LG-15-17; 76.295556° N, 68.148611° E, пелозем гумусовый перегнойный остаточно-карбонатный сильноскелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Humic Turbic)); Е – Русская Гавань, разрез RG-1-3, 76.1911° N, 62.67194° E, криозем глееватый скелетный (Skeletal Oxyaquic Cryosols (Loamic, Humic)); Ж – Русская Гавань, разрез RG-4, 76.1925° N, 62.72722° E, петрозем (Skeletal Leptosol (Loamic, Protic)); З – Русская Гавань, разрез RG-5-6, 76.19194° N, 62.73944° E, карбопетрозем гумусовый мерзлотный сильноскелетный (Calcaric Hyperskeletal Leptosol (Loamic, Humic)); И – Русская Гавань, разрез RG-7, 76.18833° N, 62.76055° E, пелозем остаточно-карбонатный сильноскелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Humic)); К – Бухта Благополучия, разрез BB-8, 75.62361° N; 63.814167° E, пелозем гумусовый остаточно-карбонатный среднескелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Humic)); Л – Бухта Благополучия, разрез BB-9-10, 75.62805° N, 63.79611° E, криозем грубогумусовый остаточно-карбонатный (Oxyaquic Cryosol (Loamic, Calcaric, Humic)).

В ходе полевых работ образцы отобрали методом усреднения пяти единичных проб. Образцы для микробиологических исследований отобрали с возможными мерами по предотвращению контаминаций и хранили в стерильных емкостях при температуре -18°C сначала в морозильной камере на научно-исследовательском судне “Профессор Молчанов”, а затем в лаборатории. Физические и химические параметры почвы определяли в воздушно-сухих образцах.

Растительный покров характеризовали общепринятыми геоботаническими методами [12].

Содержание углерода и азота определяли методом сухого сжигания на CNSH-анализаторе Elementar Vario Isotope Select (Германия) в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН (г. Москва). Полученные данные по неорганическому углероду пересчитаны на содержание CaCO_3 . Запасы органического углерода рассчитывали для каждого горизонта отдельно с учетом его мощности, плотности и содержания крупной фракции >2 мм. При подсчете суммарных запасов органического углерода результаты скла-

дывали по горизонтам. Для стандартизации результатов, а также учитывая среднюю мощность почвенного профиля на севере НЗ, запасы органического углерода пересчитывали на глубину 30 см, где это было возможно.

Биомассу прокариот оценивали с помощью метода люминесцентной микроскопии с применением флуоресцентного красителя акридина оранжевого (микроскоп Биомед 5 ПР ЛЮМ (Россия)) при увеличении 1000× с масляной иммерсией [11]. Десорбцию клеток с почвы проводили при помощи ультразвуковой установки УЗДН-1 (2 мин, сила тока 0.40 А, частота 22 кГц).

Число клеток прокариот на 1 г субстрата считали по формуле: $N = S_1 a n / V S_2 C$, где N – число клеток на 1 г субстрата; S_1 – площадь препарата, мкм²; a – количество клеток в одном поле зрения, усреднение производится по всем препаратам; n – показатель разведения бактериальной смеси, мл; V – объем капли, наносимой на стекло, мл; S_2 – площадь поля зрения микроскопа, мкм²; C – навеска субстрата, г. Длину актиномицетного мицелия в 1 г образца, NMA определяли по формуле: $NMA = S_1 a n / v S_2 c 106$, где S_1 – площадь препарата, мкм²; a – средняя длина фрагментов актиномицетного мицелия в поле зрения, мкм; n – показатель разведения суспензии, мл; v – объем капли, наносимой на стекло, мл; S_2 – площадь поля зрения микроскопа, мкм²; c – навеска образца, г.

Биомассу грибов определяли методом люминесцентной микроскопии с применением флуоресцентного красителя калькофлуора белого [11]. Учет спор и длины мицелия осуществляли на люминесцентном микроскопе Биомед 5 ПР ЛЮМ (Россия) при увеличении 400×. Десорбцию клеток с почвы проводили при помощи вортекса MSV-3500 (Латвия) при скорости 3500 об./мин в течение 10 мин.

Грибную биомассу (мг/г почвы) считали, полагая, что плотность спор равна 0.837 г/см³, а плотность мицелия – 0.628 г/см³ [25]. Содержание грибной биомассы на грамм сухой почвы рассчитывали с учетом ее влажности.

Потенциальную биологическую активность почв (базальное дыхание, субстрат-индуцированное дыхание (СИД) и активность денитрификации) определяли с помощью газохроматографических методов [11, 31]. Для оценки интенсивности СИД навески почвы (5 г) помещали во флаконы объемом 15 мл (в пятикратной повторности), увлажняли дистиллированной водой (до 60% от полной влагоемкости) и инкубировали в течение 3–5 суток во влажной камере, затем в почву добавляли глюкозу (2.5 мг/г почвы). Денитрифицирующую активность исследовали методом, основанном на использовании ацетилена в

качестве ингибитора редукасы закиси азота, что позволяет судить об активности процесса по ее накоплению в газовой фазе. В почву вносили KNO₃ (0.4 мг/г), вводили ацетилен (1 мл), флаконы герметично закрывали, создавали анаэробные условия, вытесняя воздух аргоном. Почву во флаконах инкубировали в течение 24 ч при +28°C, затем из газовой фазы во флаконе шприцем отбирали пробы объемом 0.5–1 мл.

Для определения потенциального метаногенеза в почву вносили раствор глюкозы из расчета 2.5 мг/г почвы, после чего флаконы закрывали резиновыми крышками, закрытыми герметизирующей пленкой, и продували аргоном в течение 2 мин для удаления из них кислорода. Таким образом, оценивали максимально возможную интенсивность образования метана анаэробными сообществами изучаемых почв. После продувки флаконы инкубировали в течение 24 ч в термостате при температуре +28°C. Количество накопившегося CH₄ определяли на газовом хроматографе путем отбора из флакона газовой пробы (0.5 мл) при помощи шприца.

В работе использовали газовый хроматограф Кристалл 5000.2 производства Хроматэк (Россия), в котором установлено две металлических хроматографических колонки длиной 2 м и внутренним диаметром 1 мм, наполнитель Hayesep-D 80/100. К одной из колонок подключены детектор по теплопроводности и пламенно-ионизационный детектор, позволяющие производить измерение CO₂ и CH₄; газом-носителем является гелий. Ко второй колонке подключен детектор электронного захвата, на котором проводили измерение N₂O; газ-носитель – азот.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты работы даны для территории от самого северного до самого южного участков исследований.

Растительный и почвенный покровы. Для всех негидроморфных почв характерно наличие каменных мостовых, которые часто описываются в высоких широтах полярных областей.

В районе мыса Желания описан растительный покров влажного биотопа на побережье оз. Аммонального (76.95064° N, 68.52282° E), где преобладают мхи *Bryum cryophilum* и редки куртины щучки *Deschampsia borealis*. Общее проективное покрытие растений достигает здесь 85%. Почва – криозем остаточно-карбонатный силеноскелетный (Skeletal Oxyaquic Cryosol (Loamic; Calcaric)).

В сухом биотопе плакора на мысе Маврикий (76.95493° N, 68.46068° E) цветковых растений не обнаружено. Мхи и накипные лишайники развивались только в микропонижениях. Кустистых

лишайников не выявлено. Общее проективное покрытие растений колебалось около 2–3%. Почва – петрозем криотурбированный остаточнокarbonатный сильноскелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Protic, Turbic)). Его нельзя было отнести к карбопетроземам из-за невысокого содержания карбонатов.

В районе залива Ледяная Гавань описана растительность трех биотопов. В краевой части выровненного плато (уклон 1°–2° на восток) у обрыва в 5–10 м от безымянной реки (76.29833° N, 68.153056° E) отмечены камнеломка *Saxifraga oppositifolia*, мак *Papaver polare*, крупка *Draba alpina*, ясколка *Cerastium regelii*, занимающие суммарно около 5–7% пробной площади. Лишайников мало – 0.5%, преобладают накипные формы. Почва – карбопетрозем очень сильно скелетный (Calcaric Hyperskeletal Leptosol (Loamic)).

На склоне морской террасы восточной экспозиции (уклон 3°–4°) (76.2975° N, 68.153889° E) отмечены криогенно-обусловленные полигональные полосы сообществ мхов шириной 12–15 см (отдельные участки полос до 45 см ширины) между которыми располагались щебнисто-суглинистые промежутки шириной 20–40 см. Общее проективное покрытие растений составляло до 35% (10–12% – цветковых, 20% – мхов, 2–3% – лишайников). Среди цветковых растений доминировали камнеломки *Saxifraga oppositifolia*, *S. hyperborea*, *S. cespitosa*, а также *Cerastium regelii*, *Papaver polare*, *Cochlearia groenlandica* и *Draba alpina*. Почва – пелозем гумусовый криотурбированный остаточнокarbonатный сильноскелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Humic, Turbic)).

В ветровых убежищах (76.29556° N, 68.14861° E) распространена травянисто-моховая группировка подушечников высотой 5–7 см, которые иногда формируют длинные полосы или полигоны до 1 м, обрамленные черной ветошью мхов и лишайников рода *Stereocaulon*. Проективное покрытие живых мхов составляет до 5%, ветоши мхов – до 10%. Из цветковых растений присутствуют камнеломки *Saxifraga oppositifolia*, *S. hyperborea*, фицписия *Phippsia algida*, ясколка *Cerastium regelii*, крупка *Draba* sp., мак *Papaver polare* и щучка *Deschampsia borealis*. Почва – пелозем гумусовый перегонный криотурбированный остаточнокarbonатный сильноскелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Humic Turbic)).

В районе Русской Гавани во влажном биотопе (76.1911° N, 62.67194° E) долин ручьев из цветковых растений доминировали лютик (*Ranunculus sulphureus*) и щучка *Deschampsia borealis*. Дополняли растительный покров лишайники *Alopecurus alpinus* subsp. *borealis*, ситник *Juncus biglumis*, камнеломка *Saxifraga hirculus*, ясколка *Cerastium regelii*, ожика *Luzula confusa* и фицписия *Phippsia algida*. Переувлажненная почва определена как криозем

глеватый скелетный (Skeletal Oxyaquic Cryosols (Loamic, Humic)).

Для сухих биотопов на повышенных и выровненных участках морских террас без гидроморфной нагрузки (76.1911° N, 62.67194° E) характерны лишайники *Alectoria ochroleuca*, *Ochrolechia frigida*, *Rhizocarpon geographicum*, а также мох *Niphotrichum canescens*. Отмечена камнеломка *Saxifraga oppositifolia*, дриада *Dryas octopetala*, мытник *Pedicularis hirsuta* и нехарактерный для столь северных территорий о. Северный остролодочник *Oxytropis sordida*. Почва на бескарбонатных субстратах – пелозем мерзлотный (Leptic Cryosols (Loamic)), а на карбонатных – карбопетрозем гумусовый сильноскелетный (Calcaric Hyperskeletal Leptosol (Loamic, Humic)), пелозем остаточнокarbonатный сильноскелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Humic)).

Растительность района у залива Бухта Благополучия характеризовалась двумя биотопами. Сухой биотоп расположен на высокой морской террасе (75.62361° N; 63.814167° E) с уклоном на восток примерно в 1%. Растительность – разнотравно-ясколковая группировка с общим проективным покрытием 15–18% (в прибрежной полосе на плато 30–35%) – представлена ясколкой *Cerastium regelii*, крупкой *Draba alpina*, ложечницей *Cochlearia groenlandica*, фицписией *Phippsia algida*, *Oxyria digyna*, камнеломкой *Saxifraga oppositifolia*, маком *Papaver polare*. Проективное покрытие мхов около 5%. Почва – пелозем гумусовый остаточнокarbonатный среднескелетный (Calcaric Skeletic Leptosol (Loamic, Humic)). В переувлажненном биотопе местного базиса эрозии (75.62805° N; 63.79611° E) доминируют щучка *Deschampsia borealis*, мхи и камнеломка *Saxifraga hyperborea*. Почва – криозем грубогумусовый остаточнокarbonатный (Oxyaquic Cryosol (Loamic, Calcaric, Humic)).

Свойства почв указаны в табл. 1. Кислотность исследованных почв варьирует в пределах рН_{H₂O} 7.1–8.2; рН_{KCl} 6.8–7.9. Содержание органического углерода в среднем для всех образцов составляет 3.08%, но достигает 18.69% в поверхностных органических горизонтах и остается существенным в мелкозем (органоминеральных горизонтов, не опускаясь ниже 0.21% на глубине 30 см. Более того, распределение содержания C_{орг} по профилю не всегда имеет “классический” аккумулятивный характер. В срединных и надмерзлотных горизонтах содержание C_{орг} может достигать нескольких процентов. Содержание общего азота (N_{общ}) варьирует в широком диапазоне от 0.02 до 1.23% со средним значением 0.21% для всего массива образцов. Отношение C_{орг}/N_{общ} изменяется в пределах 3–26, за исключением пелозема мерзлотного остаточнокarbonатного сильноскелетного (RG-7), в котором эта величина достигает 158. В ряде сре-

Таблица 1. Свойства почв севера Новой Земли

Почва	Обра- зец	Горизонт	Глубина, см	Влажность почвы, %	Плотность мелкозема (<2 мм), г/см ³	Содержание фракции >2 мм, % (каменис- тость)	рН _{H₂O}	рН _{KCl}	C _{орг} , %	СаСО ₃ , %	N _{общ} , %	C _{орг} / N _{общ}	Запасы C _{орг} , кг/м ²	
													в гори- зонте	в слое 0–30 см*
Мыс Желания, 76.95° N, 68.52° E														
Криозем остаточно- карбонатный силь- носkeletalный	CJ-22	O	0–3	80.3	0.3	40.3	7.3	6.8	–	–	–	–	–	–
	CJ-23	CRca	3–28	13.1	1.2	25.3	8.1	7.6	0.76	3.42	0.11	6.9	1.7	–
	CJ-24	W + C	0–23	9.0	1.1	23.9	8.0	7.1	0.33	–	0.02	16.5	0.6	0.6
	CJ-25	Cca,sk	23–33	8.2	1.1	43.5	8.1	7.5	0.23	4.41	0.03	7.7	0.1	–
Ледяная Гавань, 76.29° N, 68.15° E														
Карбопетрозем очень сильно skeletalный	LG-11	W + Cca,sk	0–17	8.2	1.1	58.4	8.1	7.9	2.06	40.15	0.13	15.8	1.6	–
	LG-12	Wca	0–4	6.2	0.5	45.9	7.6	7.2	0.82	9.91	0.14	2.6	0.2	2.2
	LG-13	Cca	4–19	9.1	1.0	47.0	7.9	7.4	1.16	12.50	0.14	8.9	0.	–
	LG-14	Cca	19–32	38.6	1.1	–	8.0	7.4	1.52	–	0.17	10.1	1.2	–
Петрозем гумусовый криотурбированный остаточно-карбонат- ный сильноskeletalный	LG-15	O + W	0–5	52.8	0.4	32.0	7.4	7.4	18.69	–	1.23	15.2	3.7	5.2
	LG-16	Cca	4–17	14.8	1.2	26.1	8.0	7.5	1.37	33.15	0.14	9.8	1.3	–
	LG-17	Cca	17–30	13.7	1.2	58.4	8.2	7.4	0.21	2.67	0.03	7.0	0.2	–

Таблица 1. Окончание

Почва	Обра- зец	Горизонт	Глубина, см	Влажность почвы, %	Плотность мелкозема (<2 мм), г/см ³	Содержание фракции >2 мм, % (каменис- тость)	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	C _{орг} , %	СаСО ₃ , %	N _{общ} , %	C _{орг} / N _{общ}	Запасы C _{орг} , кг/м ²	
													в гори- зонте	в слое 0–30 см*
Русская Гавань, 76.19° N, 62.72° E														
Криозем глееватый скелетный	RG-1	O	0–4	65.2	0.2	–	7.1	7.2	9.80	–	0.63	15.6	0.8	6.4
	RG-2	CR	4–11	47.8	1.1	12.8	7.5	7.1	3.85	–	0.32	12.0	2.6	
	RG-3	CRg	11–22	38.0	1.2	65.3	7.9	7.5	2.76	–	0.19	14.5	1.3	
	RG-4	O + C	0–21	15.4	1.0	66.7	8.0	7.4	0.83	–	0.1	8.3	0.6	–
	RG-5	Wca	0–9	11.3	0.9	46.5	8.2	7.7	2.59	28.90	0.1	25.9	1.1	4.1
	RG-6	Cca,sk	9–16	9.3	1.2	40.9	8.2	7.7	2.13	30.57	0.1	21.3	1.1	
	RG-7	O + Cca	0–14	14.8	1.2	42.4	8.0	7.5	6.32	18.83	0.1	158.0	6.1	–
Бухта Благополучия, 75.62° N; 63.80° E														
Пелозем гумусовый остаточно-карбонат- ный среднескелетный	BB-8	W + Cca	0–31	11.4 (19.5)	1.2	27.3	8.0	7.7	0.94	8.16	0.11	8.5	2.5	2.4
	BB-9	AOca	0–10	49.9	0.8	4.3	7.8	7.56	1.38	5.91	0.11	12.5	1.1	8.2
	BB-10	CR	10–19	11.4	1.2	–	7.5	6.9	3.84	–	0.29	13.2	4.1	

* Прочерк в этой графе означает, что из-за малости профиля расчет запасов углерода на 30 см некорректен.

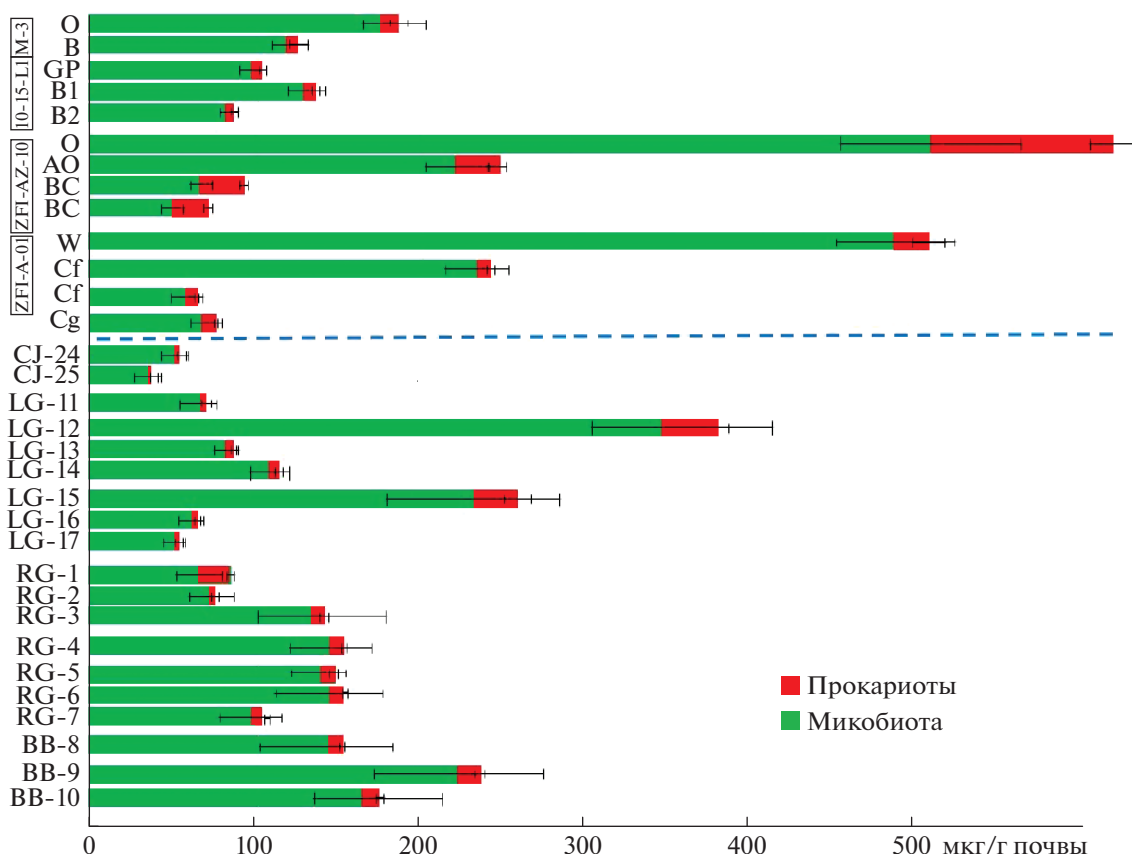


Рис. 3. Распределение микробной биомассы по профилям почв в точках исследования на о. Северный архипелага Новая Земля. М3 – Восточная Антарктида, оазис Холмы Ларсеманн, почва с поверхностными органогенными горизонтами (данные по [22]); 10-15L1 – Восточная Антарктида, оазис Холмы Ларсеманн, почва с гиполитными органогенными горизонтами (по [22]); ZFI-AX-10 – Земля Франца-Иосифа, о. Земля Александры, литозем грубогумусовый мерзлотный (по [21]); ZFI-A-01 – Земля Франца-Иосифа, о. Алджер, псаммозем глееватый мерзлотный (по [21]).

динных горизонтов значения $C_{орг}/N_{общ}$ сопоставимы с таковыми в органогенных горизонтах.

Рассчитаны суммарные запасы $C_{орг}$ стандартизированные на глубину 30 см. Средние значения запасов для всех изученных почв составляют 4.3 кг $C_{орг}/м^2$. На фактическую величину запасов значительное влияние оказывает большое содержание крупных фракций (более 2 мм), которое достигает 67% (в среднем 38%).

В исследованных почвах велико содержание карбоната кальция, доля которого составляет от 2.67 до 40.15%. Наименьшие значения (единицы процентов) характерны для всех профилей мыса Желания и Бухты Благополучия. Максимум $CaCO_3$ (десятки процентов) выявлен в почвах Ледяной Гавани и Русской Гавани. Однако в случае почвообразования на бескарбонатных субстратах вскипание от HCl и карбонаты в профиле отсутствуют.

Уровень влажности исследованных почв севера НЗ существенно различается от 6 до 80%, причем для большинства профилей ее уровень резко уменьшается с глубиной.

Общая биомасса микроорганизмов в почвах севера НЗ варьирует от 22.50 мкг/г почвы в поверхностном горизонте W + C петрозема криотурбированного остаточно-карбонатного сильноносkeletalного мыса Желания (профиль CJ-24-25) до 390.18 мкг/г почвы в горизонте Wca пелозема гумусового криотурбированного остаточно-карбонатного сильноносkeletalного района Ледяной Гавани (профиль LG-12-14) (рис. 3). Почти для всех почв НЗ характерно резкое уменьшение микробной биомассы вниз по профилю. Большая часть микробной биомассы (до 50%) сконцентрирована в поверхностном горизонте каждой из почв. В то же время выявлено некоторое увеличение значений биомассы микроорганизмов (локальный максимум) в третьем сверху горизонте по сравнению со вторым для профилей LG-12-14, LG-15-17 и RG-1-3. В профиле RG-5-6 биомасса верхнего и нижнего горизонтов достоверно не отличается. Профиль RG-1-3 уникален, поскольку наибольшие значения биомассы микроорганизмов выявлены в самом глубоком горизонте. Запасы микробной биомассы для исследованных почв

НЗ существенно отличаются. Они минимальны (28.63 мкг/г почвы) для профиля петрозема криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного мыса Желания CJ-24-25, а максимальны, больше на порядок (201.57 мкг/г почвы), для пелозема гумусового криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного района Ледяной Гавани LG-12-14. Доля микобиоты в микробной биомассе высока и составляет от 80 до 98%. Наименьшая доля грибов обнаружена в органогенных, а наибольшая – в минеральных горизонтах.

Биомасса прокариот невелика – от 0.50 до 19.05 мкг/г почвы (табл. 2). Минимальные значения (десятые доли и единицы мкг/г почвы) отмечены для всех минеральных горизонтов, а максимальные (>10 мкг/г почвы) – для органогенных горизонтов. В профилях пелозема гумусового криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного и пелозема гумусового перегнойного остаточного-карбонатного сильноскелетного Ледяной Гавани (LG-12-14 и LG-15-17 соответственно), а также в криоземе глееватом скелетном Русской Гавани (RG-1-3) биомасса прокариот резко уменьшается вниз по профилю. Также резкое уменьшение прокариот в подповерхностном горизонте по сравнению с поверхностным горизонтом отмечено и в других профилях (CJ-22-23, CJ-24-25, ВВ-9-10, RG-5-6).

Численность прокариот в исследованных почвах колеблется от 1.5×10^7 до 9.66×10^8 кл./г почвы. Наименьшие и наибольшие значения численности выявлены в глубинном Cca и поверхностном O + Wh горизонтах соответственно пелозема гумусового перегнойного остаточного-карбонатного ветрового убежища района Ледяной Гавани (профиль LG-15-17). Верхний органогенный горизонт каждого из исследованных почвенных профилей содержал порядка 10^8 кл./г почвы, а подповерхностные горизонты – порядка 10^7 кл./г почвы.

Длина актиномицетного мицелия в образцах мала и варьирует от 0.58 до 23.52 м/г почвы. Минимум выявлен в минеральном горизонте Cca,sk петрозема остаточного-карбонатного сильноскелетного на мысе Желания (CJ-25), а максимум – в органогенном горизонте O криозема остаточного-карбонатного сильноскелетного также в этом районе архипелага (CJ-22). Доля актиномицетного мицелия в биомассе прокариот колебалась от десятых долей и единиц процента в верхних горизонтах до трех десятков процентов в срединных. Минимальная доля мицелия (0.4%) выявлена в поверхностном органогенном горизонте Wca (LG-12), а максимальная (30.8%) – в минеральном горизонте Cca (LG-14) пелозема гумусового криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного Ледяной Гавани.

Образцы почв мыса Желания беднее прокариотами, чем остальные исследованные почвы. Сред-

няя биомасса прокариот на образец здесь составляет лишь 2.76 мкг/г почвы, несмотря на наличие над криоземом остаточного-карбонатным сильноскелетным (профиль CJ-22-23) обильного мохового очеса. В данном профиле так же, как в петроземе криотурбированном остаточного-карбонатном сильноскелетном (профиль CJ-24-25) выявлено уменьшение биомассы прокариот от поверхностных горизонтов к глубинным. Длина актиномицетного мицелия для образцов почв из района мыса Желания сильно разнится. Поверхностный горизонт O криозема остаточного-карбонатного сильноскелетного (профиль CJ-22-23) имеет максимальные значения (23.52 м/г почвы) по всем исследуемым образцам архипелага, в то время как нижележащий горизонт CRca содержал только 5.95 м/г почвы актиномицетного мицелия; а петрозема криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного (профиль CJ-24-25) характеризуется минимальными значениями – 1.11 м/г почвы для верхнего горизонта W + C и 0.58 м/г почвы для нижнего Cca,sk. Доля актиномицетного мицелия для криозема остаточного-карбонатного мыса Желания возрастает от поверхностного горизонта (4.7%) к глубинному (9.9%), но убывает вниз по профилю петрозема криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного с 5.3 до 4.0%.

Длина мицелия актиномицетов во всех профилях Ледяной Гавани мала (до 6.3 м/г почвы) и имеет различное распределение по профилям. В пелоземе гумусовом криотурбированном остаточного-карбонатном сильноскелетном (профиль LG-12-14) минимальное развитие мицелия (2.1 м/г почвы) выявлено в верхнем горизонте Wca, а максимальное (6.3 м/г почвы) – в подповерхностном горизонте Cca. Напротив, профиль LG-15-17 характеризуется постепенным уменьшением длины мицелия от поверхностных (3–4 м/г почвы) к глубинным горизонтам (1.1 м/г почвы).

Для района Русской Гавани было заложено больше почвенных разрезов, чем на других исследованных территориях НЗ, и варьирование значений прокариотной биомассы здесь также шире. Минимум прокариотной биомассы (1.17 мкг/г почвы) отмечен в подповерхностном горизонте CR, а максимум (16.97 мкг/г почвы) – для горизонта O профиля RG-1-3 криозема глееватого скелетного. Для этого профиля характерно резкое сокращение обилия прокариот вниз по профилю. Профиль RG-5-6 карбопетрозема гумусового мерзлотного сильноскелетного, имеющего всего два горизонта также демонстрирует резкое уменьшение прокариотной биомассы от органогенного горизонта Wca (8.16 мкг/г почвы) к минеральному Cca,sk (1.54 мкг/г почвы).

Содержание прокариотной биомассы для петрозема и пелозема остаточного-карбонатного силь-

Таблица 2. Структура биомассы прокариот

Почва	Обра- зец	Гори- зонт	Глуби- на, см	Числен- ность клеток прокариот, ×10 ⁸ кл./г	Биомасса однокле- точных прокариот, мкг/г почвы	Длина актиноми- цетного мицелия, м/г	Биомасса актиноми- цетного мицелия, мкг/г	Доля мицелия в общей биомассе, %	Общая биомасса прокариот, мкг/г почвы	Средняя биомасса прокариот в профиле, мкг/г почвы	Соотно- шение однокле- точные точнне прокариоты/ актиноми- цеты (по массе)
Мыс Желания, 76.95° N, 68.52° E											
Криозем остаточно- карбонатный силь- носkeletalный	CJ-22	O	0–3	8.85 ± 1.77	17.70 ± 3.52	23.52 ± 4.87	0.87 ± 0.218	4.68	18.57 ± 3.671	10.40 ± 2.01	20.3
	CJ-23	CRca	3–28	0.66 ± 0.13	1.32 ± 0.26	5.95 ± 1.24	0.22 ± 0.05	9.9	2.23 ± 0.45		9.1
	CJ-24	W + C	0–23	0.36 ± 0.07	0.72 ± 0.14	1.11 ± 0.23	0.04	5.3	0.76 ± 0.15	0.63 ± 0.12	18.0
	CJ-25	Cca,sk	23–33	0.24 ± 0.05	0.48 ± 0.09	0.58 ± 0.12	0.02	4.0	0.50 ± 0.10		24.0
Ледяная Гавань, 76.29° N, 68.15° E											
Карбопетрозем очень сильно skeletalный	LG-11	W + + Cca,sk	0–17	1.16 ± 0.23	2.32 ± 0.46	3.44 ± 0.71	0.13 ± 0.02	5.3	2.45 ± 0.49	2.45 ± 0.47	17.8
	LG-12		0–4	9.07 ± 1.81	18.1 ± 3.60	2.10 ± 0.44	0.08 ± 0.01	0.4	18.18 ± 3.63	6.57 ± 1.26	226.3
	LG-13	Wca	4–19	0.33 ± 0.076	0.65 ± 0.13	6.30 ± 0.23	0.23 ± 0.05	26.1	0.88 ± 0.18		2.82
	LG-14	Cca	19–32	0.23 ± 0.05	0.45 ± 0.09	5.37 ± 0.20	0.20 ± 0.04	30.8	0.65 ± 0.13		23.2
	LG-15	O + W	0–5	9.66 ± 1.93	18.9 ± 3.75	4.09 ± 0.15	0.15 ± 0.03	0.8	19.05 ± 3.81	23.56 ± 5.52	126.0
	LG-16	Cca	4–17	2.02 ± 0.40	4.04 ± 0.80	3.39 ± 0.12	0.13 ± 0.02	3.1	4.17 ± 0.83		31.1
	LG-17	Cca	17–30	0.15 ± 0.03	0.30 ± 0.06	1.05 ± 0.37	0.04	11.8	0.34 ± 0.07		7.5

Таблица 2. Окончание

Почва	Обра- зец	Гори- зонт	Глуби- на, см	Числен- ность клеток прокариот, $\times 10^8$ кл./г	Биомасса однокле- точных прокариот, мкг/г почвы	Длина актиноми- цетного мицелия, м/г	Биомасса актиноми- цетного мицелия, мкг/г	Доля мицелия в общей биомассе, %	Общая биомасса прокариот, мкг/г почвы	Средняя биомасса прокариот в профиле, мкг/г почвы	Соотно- шение однокле- точные прокариоты/ актиноми- цеты (по массе)
Русская Гавань, 76.19° N, 62.72° E											
Криозем глееватый скелетный	RG-1	O	0–4	7.77 ± 1.55	16.58 ± 3.29	10.33 ± 0.37	0.39 ± 0.07	2.3	16.97 ± 3.39	6.51 ± 1.25	42.5
	RG-2	CR	4–11	0.40 ± 0.08	0.84 ± 0.17	8.76 ± 0.31	0.33 ± 0.06	28.2	1.17 ± 0.23		2.54
	RG-3	CRg	11–22	0.61 ± 0.12	1.28 ± 0.25	3.13 ± 0.11	0.12 ± 0.02	8.6	1.40 ± 0.28		10.7
	RG-4	O + C	0–21	1.73 ± 0.35	3.46 ± 0.69	3.42 ± 0.68	0.13 ± 0.02	3.6	3.59 ± 0.72	3.59 ± 0.69	26.6
	RG-5	Wca	0–9	3.79 ± 0.76	8.09 ± 1.61	1.74 ± 0.06	0.07 ± 0.01	0.8	8.16 ± 1.64	4.85 ± 0.93	120.7
	RG-6	Cca,sk	9–16	0.55 ± 0.11	1.10 ± 0.22	11.77 ± 0.42	0.44 ± 0.09	28.6	1.54 ± 0.31		2.5
	RG-7	O + Cca	0–14	1.58 ± 0.31	3.18 ± 0.63	7.19 ± 0.25	0.27 ± 0.05	33.8	3.45 ± 0.69	3.45 ± 0.66	11.8
Бухта Благополучия, 75.62° N; 63.80° E											
Пелозем гумусовый остаточно-карбонат- ный среднескелетный	BB-8	W + Cca	0–31	2.83 ± 0.57	5.65 ± 1.12	11.26 ± 2.33	0.42 ± 0.08	6.9	6.07 ± 1.21	6.07 ± 1.17	13.5
	BB-9	AOca	0–10	1.56 ± 0.31	17.80 ± 3.54	3.21 ± 0.67	0.12 ± 0.02	0.7	17.92 ± 3.58	12.38 ± 2.38	148.3
	BB-10	CR	10–19	0.30 ± 0.06	6.30 ± 1.25	14.53 ± 3.01	0.54 ± 0.11	7.9	6.84 ± 1.37		11.7

носкелетного Русской Гавани — 3.59 и 3.45 мкг/г почвы — соответственно RG-4 и RG-7. Длина актиномицетного мицелия в почвах района Русской Гавани колеблется от 1.77 в горизонте Wca профиля RG-5 карбопетрозема гумусового мерзлотного сильноскелетного до 10.33 м/г почвы в органогенном горизонте O криозема глееватого RG-1-3. Длина мицелия прокариот резко сокращается с глубиной для всех профилей, кроме RG-5-6 карбопетрозема гумусового мерзлотного сильноскелетного с обратной тенденцией. Доля мицелия актиномицетов низка (3.6%) в петроземе RG-4, но значительно выше в пелоземе остаточного-карбонатного сильноскелетного RG-7 (33.8%); в криоземе глееватом скелетном (профиль RG-1-3) максимум (28.2%) в подповерхностном горизонте CR; для карбопетрозема гумусового мерзлотного сильноскелетного RG-5-6 резко увеличивается от поверхностного Wca (0.8%) к срединному глубинному горизонту Cca,sk¹ (28.6%).

Пелозем гумусовый остаточного-карбонатный среднескелетный и криозем грубогумусовый остаточного-карбонатный района Бухты Благополучия достаточно богаты прокариотами, биомасса которых составляет в среднем 9.23 мкг/г почвы. Биомасса прокариот в криоземе грубогумусовом остаточного-карбонатном ВВ-9-10 уменьшается от поверхностного горизонта АОса (17.92 мкг/г почвы) к нижнему CR (6.84 мкг/г почвы). В единственном горизонте W + Cca пелозема гумусового остаточного-карбонатного среднескелетного (профиль ВВ-8) биомасса составляет 6.07 мкг/г почвы, а длина актиномицетного мицелия больше (11.26 м/г почвы), чем для образцов района Ледяной Гавани. В криоземе грубогумусовом остаточного-карбонатном Бухты Благополучия длина мицелия актиномицетов возрастает с глубиной от 3.21 м/г почвы для горизонта АОса до 14.53 м/г почвы для криогенного горизонта CR. Доля актиномицетного мицелия резко увеличивается с глубиной для профиля криозема грубогумусового остаточного-карбонатного от 0.7% в АОса до 7.9% в CR; а в горизонте W + Cca пелозема гумусового остаточного-карбонатного среднескелетного тоже весьма велика — 6.9%.

Биомасса грибов минимальна (0.022 мг/г почвы) в минеральном горизонте Cca,sk петрозема криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного района мыса Желания (профиль CJ-24-25), а максимальна (0.372 мг/г почвы) — в органогенном органико-минеральном горизонте Wca пелозема гумусового криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного (профиль LG-12-14) в районе Ледяной Гавани. Грибная биомасса в профилях всех исследованных

почв резко уменьшается от поверхностных к срединным горизонтам. Однако для криозема глееватого скелетного (разрез RG-1-3) и карбопетрозема гумусового мерзлотного сильноскелетного (профиль RG-5-6) Русской Гавани биомасса грибов, наоборот, повышается с увеличением глубины.

Наименьшее содержание мицелия (1.30 м/г почвы) обнаружено в нижнем горизонте Cca,sk петрозема криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного района мыса Желания (профиль CJ-24-25), а наибольшее (166.61 м/г почвы) — выявлено в поверхностном горизонте Wca пелозема гумусового криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного Ледяной Гавани (профиль LG-12-14) (табл. 3). Более половины биомассы (54.22–68.08%) приходится на мицелий только в пяти образцах преимущественно из верхних органогенных горизонтов, тогда как в остальных случаях преобладают споры, а доля гиф составляет от 3.76 до 45.18%. Около 65% мицелия представлено тонкими формами до 3 мкм в диаметре. Не обнаружены базидиомицетные прядки на мицелии грибов, а также ризоморфы и склероции.

Грибные споры, выявленные в исследованных образцах, представлены мелкими формами до 3 мкм. Для каждого горизонта численность пропагул микобиоты составляет от 10⁴ до 10⁵ шт./г почвы, причем до 75% спор диаметром 2 мкм и одночлочно. Крупные споры более 5 мкм не обнаружены. Около 62% пропагул округлой формы с гладкой поверхностью; 11% округлы и шероховаты; 23% — овальные с гладкой поверхностью; 4% — имеют овальную форму с неровностями.

Как и для прокариот, в профилях пелозема гумусового криотурбированного остаточного-карбонатного сильноскелетного и пелозема гумусового перегнойного остаточного-карбонатного сильноскелетного (LG-12-14 и LG-15-17 соответственно) Ледяной Гавани биомасса грибов резко уменьшается вниз по профилю от сотен до десятков мг/г почвы, а длина мицелия сокращается с величин более сотни до нескольких десятков м/г почвы. Однако в разрезе LG-12-14 обилие грибов вновь увеличивается в наиболее глубоком горизонте Cca до 0.124 мг/г почвы. Единственный горизонт W + Cca,sk карбопетрозема очень сильно скелетного Ледяной Гавани (профиль LG-11) характеризуется чрезвычайно малым развитием микобиоты — биомасса 0.038 мг/г почвы, а длина мицелия — 2.79 м/г почвы. Подповерхностный горизонт Cca пелозема гумусового перегнойного остаточного-карбонатного сильноскелетного (LG-15-17) — единственный среди всех исследованных образцов НЗ, где не обнаружен мицелий.

Биологическая активность. Базальное почвенное дыхание из исследованных образцов варьиру-

¹ Индекс sk вставлен по предложению Н.Б. Хитрова, М.И. Герасимовой для обозначения очень сильно скелетного горизонта.

Таблица 3. Структура биомассы грибов

Почва	Обра- зец	Гори- зонт	Глуби- на, см	Грибной мицелий (d = 3 мкм)		Доля мицелия в общей биомассе, %	Споры				Общая биомасса спор, мг/г почвы	Суммарная биомасса грибов, мг/г почвы	Средняя биомасса грибов в профиле, мг/г почвы
				d = 2 мкм			d = 3 мкм		численн ость, шт./г × 10 ⁴	масса, мг/г			
				числен- ность, шт./г × 10 ⁵	масса, мг/г		числен- ность, шт./г × 10 ⁵	масса, мг/г					
Мыс Желания, 76.95° N, 68.52° E													
Криозем оста- точно-карбонат- ный сильноске- летный	CJ-22	O	0–3	биомасса мицелия грибов, м г/г	длина мицелия грибов, м	63.82	0.75 ± ± 0.12	0.025 ± ± 0.004	2.62 ± ± 0.42	0.030 ± ± 0.006	0.055 ± ± 0.011	0.151 ± ± 0.032	0.104 ± ± 0.022
	CJ-23	CRca	3–28	0.011 ± ± 0.002	8.56 ± ± 1.17	18.63	0.63 ± ± 0.10	0.021 ± ± 0.003	2.27	0.026 ± ± 0.005	0.047 ± ± 0.010	0.058 ± ± 0.012	
	CJ-24	W + C	0–23	0.005	4.28 ± ± 0.59	15.88	0.30 ± ± 0.05	0.010 ± ± 0.002	1.66	0.019 ± ± 0.003	0.029 ± ± 0.006	0.034 ± ± 0.007	0.028 ± ± 0.006
	CJ-25	Cca,sk	23–33	0.002	1.30 ± ± 0.18	7.48	0.09 ± ± 0.14	0.003	1.48	0.017 ± ± 0.003	0.020 ± ± 0.004	0.022 ± ± 0.004	
Ледяная Гавань, 76.29° N, 68.15° E													
Карбопетрозем очень сильно ске- летный Пелозем гумусо- вый криогурби- рованный остаточно-карбо- натный сильноос- келетный Пелозем гумусо- вый перегной- ный остаточно- карбонатный сильноскелетный	LG-11	W + + Cca,sk	0–17	0.004	2.79 ± ± 0.38	9.21	0.48 ± ± 0.08	0.016	1.55	0.018 ± ± 0.003	0.034 ± ± 0.007	0.038 ± ± 0.008	0.038 ± ± 0.008
	LG-12	Wca	0–4	0.211 ± ± 0.042	166.61 ± ± 22.97	56.61	1.65 ± ± 0.26	0.055 ± ± 0.011	9.12	0.106 ± ± 0.022	0.161 ± ± 0.032	0.372 ± ± 0.077	0.195 ± ± 0.040
	LG-13	Cca	4–19	0.028 ± ± 0.005	21.78 ± ± 3.00	30.90	0.66 ± ± 0.11	0.022 ± ± 0.004	3.35	0.039 ± ± 0.008	0.061 ± ± 0.012	0.089 ± ± 0.0021	
	LG-14	Cca	19–32	0.055 ± ± 0.011	43.56 ± ± 6.00	44.35	0.84 ± ± 0.13	0.028 ± ± 0.006	3.53	0.041 ± ± 0.009	0.069 ± ± 0.013	0.124 ± ± 0.029	
	LG-15	O + W	0–5	0.147 ± ± 0.029	116.35 ± ± 16.04	64.47	1.38 ± ± 0.22	0.046 ± ± 0.010	3.05	0.035 ± ± 0.007	0.081 ± ± 0.015	0.228 ± ± 0.054	0.111 ± ± 0.023
	LG-16	Cca	4–17	–	нет	0.00	1.17 ± ± 0.19	0.039 ± ± 0.008	1.66	0.019 ± ± 0.003	0.058 ± ± 0.011	0.058 ± ± 0.011	
	LG-17	Cca	17–30	0.015 ± ± 0.003	11.54 ± ± 1.59	29.59	0.81 ± ± 0.13	0.027 ± ± 0.006	0.61	0.007	0.034 ± ± 0.007	0.049 ± ± 0.010	

Таблица 3. Окончание

Почва	Обра- зец	Гори- зонт	Глуби- на, см	Грибной мицелий (d = 3 мкм)		Доля мицелия в общей биомассе, %	Спores				Общая биомасса спор, мг/г почвы	Суммарная биомасса грибов, мг/г почвы	Средняя биомасса грибов в профиле, мг/г почвы
				биомасса мицелия грибов, мг/г	длина мицелия грибов, м		d = 2 мкм числен- ность, шт./г × 10 ⁵	масса, мг/г	d = 3 мкм числен- ность, шт./г × 10 ⁴	масса, мг/г			
Русская Гавань, 76.19° N, 62.72° E													
Криозем глеева- тый скелетный	RG-1	O	0-4	0.028 ± 0.005	22.66 ± ± 3.12	58.22	0.15 ± ± 0.02	0.005	3.05	0.035 ± ± 0.007	0.040 ± ± 0.009	0.068 ± ± 0.016	0.089 ± ± 0.0021
	RG-2	CR	4-11	0.036 ± ± 0.007	28.60 ± ± 3.94	54.29	0.18 ± ± 0.03	0.006	3.22	0.037	0.043 ± ± 0.009	0.079 ± ± 0.019	
	RG-3	CRg	11-22	0.030 ± ± 0.006	23.77 ± ± 3.28	25.50	1.68 ± ± 0.27	0.056 ± ± 0.011	3.05	0.035 ± ± 0.007	0.091 ± ± 0.0109	0.121 ± ± 0.029	
	RG-4	O + C	0-21	0.008 ± ± 0.001	6.50 ± ± 0.90	32.73	0.18 ± ± 0.03	0.006	2.96	0.034 ± 0.007	0.040 ± ± 0.009	0.122 ± ± 0.029	0.122 ± ± 0.029
	RG-5	Wca	0-9	0.004	3.42 ± ± 0.47	3.76	0.33 ± ± 0.05	0.011 ± ± 0.002	5.24	0.060 ± ± 0.012	0.071 ± ± 0.014	0.114 ± ± 0.027	0.121 ± ± 0.029
	RG-6	Cca,sk	9-16	0.008 ± ± 0.001	6.02 ± ± 0.83	5.98	0.30 ± ± 0.05	0.010 ± ± 0.002	3.53	0.041 ± ± 0.009	0.051 ± ± 0.010	0.127 ± ± 0.030	
	RG-7	O + Cca	0-14	0.005	4.23 ± ± 0.58	5.39	0.30 ± ± 0.05	0.010 ± ± 0.002	3.05	0.035 ± ± 0.007	0.045 ± ± 0.009	0.098 ± ± 0.023	0.098 ± ± 0.023
Бухта Благополучия, 75.62° N; 63.80° E													
Пелозем гумосо- вый остаточно- карбонатный среднескелетный	BB-8	W + Cca	0-31	0.032 ± ± 0.006	24.95 ± ± 3.44	22.34	1.65 ± ± 0.26	0.055 ± ± 0.011	4.72	0.054 ± ± 0.011	0.109 ± ± 0.023	0.141 ± ± 0.029	0.141 ± ± 0.029
	BB-9	AOca	0-10	0.131 ± ± 0.026	104.06 ± ± 14.34	68.08	0.69 ± ± 0.11	0.023 ± ± 0.004	3.41	0.039 ± ± 0.008	0.062 ± ± 0.013	0.193 ± ± 0.040	0.179 ± ± 0.037
	BB-10	CR	10-19	0.075 ± ± 0.015	59.01 ± ± 8.13	45.18	1.08 ± ± 0.17	0.036 ± ± 0.007	4.72	0.054 ± ± 0.011	0.090	0.165 ± ± 0.034	0.165 ± ± 0.034

Таблица 4. Биологическая активность почв

Почва	Образец	Индекс горизонта	Денитрификация мкг N–N ₂ O/(г сут)	Базальное дыхание (мкг C–CO ₂)	СИД (мкг C–CO ₂)	Метаногенез, нг CH ₄ /(г сут)
Мыс Желания, 76.95° N, 68.52° E						
Криозем остаточно-карбонатный сильноскелетный	CJ-22	O	8.55	158.00	957.19	5.62
	CJ-23	CRca	7.28	7.50	22.08	2.21
Петрозем криотурбированный остаточно-карбонатный сильноскелетный	CJ-24	W + C	2.93	1.49	6.47	2.78
	CJ-25	Cca,sk	3.86	1.45	4.48	1.62
Ледяная Гавань, 76.29° N, 68.15° E						
Карбопетрозем очень сильно скелетный	LG-11	W+Cca,sk	4.96	2.17	3.36	2.17
Пелозем гумусовый криотурбированный остаточно-карбонатный сильноскелетный	LG-12	Wca	14.27	211.91	661.90	4.20
	LG-13	Cca	8.92	0.26	14.89	0.48
	LG-14	Cca	4.17	0.41	6.20	0.72
Пелозем гумусовый перегнойный остаточно-карбонатный сильноскелетный	LG-15	O + W	16.64	149.18	757.40	6.18
	LG-16	Cca	5.29	0.27	9.24	1.28
	LG-17	Cca	6.61	3.13	16.75	1.60
Русская Гавань, 76.19° N, 62.72° E						
Криозем глееватый скелетный	RG-1	O	46.03	243.73	1476.07	5.62
	RG-2	CR	9.73	18.01	97.18	0.65
	RG-3	CRg	6.11	12.86	56.43	1.28
Петрозем	RG-4	O + C	0.67	3.58	10.03	0.59
Карбопетрозем гумусовый мерзлотный сильноскелетный	RG-5	Wca	0.52	4.50	20.42	0.86
	RG-6	Cca,sk	0.50	3.51	17.32	1.71
Пелозем остаточно-карбонатный сильноскелетный	RG-7	O + Cca	1.78	6.42	35.22	1.07
Бухта Благополучия, 75.62° N; 63.80° E						
Пелозем гумусовый остаточно-карбонатный среднескелетный	BB-8	W + Cca	1.13	2.06	9.86	1.82
Криозем грубогумусовый остаточно-карбонатный	BB-9	AOca	14.72	27.83	73.89	2.81
	BB-10	CR	18.81	24.34	103.29	0.80

ет в широком диапазоне от 0.27 до 243.73 мкг C–CO₂/(г сут). Минимальные значения (десятые доли и единицы мкг C–CO₂/(г сут)) выявлены во всех минеральных горизонтах исследованных профилей, кроме криозема глееватого скелетного Русской Гавани (профиль RG-1-3), где базальное дыхание достигает десятков мкг C–CO₂/(г сут). Максимальное базальное дыхание (149.18–243.73 мкг C–CO₂/(г сут)) отмечено в органогенных горизонтах, представленных моховыми очесами или альго-бактериальными матами. Интенсивность базального дыхания резко снижается от поверхностных к срединным горизонтам, однако в минеральных горизонтах убывает гораздо менее резко.

СИД изменялось от 3.36 до 1476.07 мкг C–CO₂/(г сут), то есть на порядок больше базального

дыхания. Наименьшие значения (единицы мкг C–CO₂/(г сут)) характерны для минеральных горизонтов, а наибольшие (сотни и тысячи единиц мкг C–CO₂/(г сут)) – для мохово-лишайниковых подстилочно-торфяных горизонтов и горизонтов, обогащенных альго-бактериальными ассоциациями. Интенсивность СИД резко снижается от поверхностных горизонтов к глубинным, однако в минеральных убывает более плавно. Исключение составляет криозем грубогумусовый остаточно-карбонатный Бухты Благополучия (BB-9-10), в котором наблюдается увеличение значений СИД с увеличением глубины. Для органогенных горизонтов разница с актуальной эмиссией в среднем составляет 1.5 раза, а для минеральных горизонтов – до порядка.

Потенциальная активность метаногенеза (эмиссия CH_4) в изученных почвах НЗ варьировала от 0.48 до 6.18 нг CH_4 /(г сут). Минимальный метаногенез характерен для срединных минеральных горизонтов, а максимальный — для поверхностных органогенных. В то же время имела место локальная активность процесса (до 1.28 нг CH_4 /(г сут)) в оглеенных и окарбонченных горизонтах.

Интенсивность денитрификации изменялась от 0.50 до 18.81 мкг $\text{N}-\text{N}_2\text{O}$ /(г сут). Однако в поверхностном горизонте О криозема глееватого склетного Русской Гавани (профиль RG-1-3) интенсивность процесса доходила до 46.03 мкг $\text{N}-\text{N}_2\text{O}$ /(г сут). Наименьшие значения (десятые доли и единицы мкг $\text{N}-\text{N}_2\text{O}$ /(г сут)) приурочены к профилям петрозема (RG-4), карбопетрозема гумусового мерзлотного сильноскелетного (RG-5-6) и пелозему остаточно-карбонатному сильноскелетному (RG-7) Русской Гавани вне зависимости от глубины. Максимальные показатели интенсивности процесса выявлены в поверхностных органогенных горизонтах и криогенном горизонте CR криозема грубогумусового остаточно-карбонатного Бухты Благополучия (профиль ВВ-9-10). В целом денитрификация уменьшалась вниз по профилю всех исследованных почв, кроме профиля ВВ-9-10, где обнаружена обратная закономерность.

ОБСУЖДЕНИЕ

Растительный покров. Состав растительных ассоциаций изученных территорий сходен с данными геоботаников, работавших на северной части о. Северный НЗ [1, 16, 20, 27, 32]. По нашим данным доминантными семействами на севере архипелага являются *Roaceae* и *Brassicaceae*, как указано в других работах [1, 16, 20]. Однако нами впервые отмечен нехарактерный для о. Северный остролодочник грязноватый *Oxytropis sordida*, появление которого может быть связано с локальными теплыми микроклиматическими условиями [71].

Почвенные свойства. Присутствие бескарбонатных почв в почвенном покрове, а также обусловленность наличия карбонатов в профиле исходной карбонатностью субстратов позволили заключить, что большинство почвенных разностей и структур почвенного покрова более характерно для высокоарктических (тундро)пустошей [3, 21], чем для арктических пустынь, к которым принято относить ландшафты севера НЗ [1, 2, 20].

Среди изученных почв НЗ преобладали пелоземы, что несколько противоречит данным о доминировании на севере архипелага литоземов и петроземов [4, 19]. Это расхождение, вероятно, является следствием недостаточной изученности

почвенного покрова о. Северный. Глубина заложённых профилей не превышала 33 см, а число горизонтов варьировало от 1 до 3. Это характеризует данные почвы как маломощные [33, 54] и подтверждает другие почвенные работы по северу НЗ [5, 15, 19].

Содержание органического углерода и азота исследованных почв НЗ несколько меньше, чем для более северных территории архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), но в целом сходно по порядку значений [21]. Увеличение количества углерода и азота в нижней части некоторых изученных профилей может быть вызвано морозобойным растрескиванием грунта, высокой порозностью щебнистых субстратов и перемещением органического вещества в глубокие горизонты [58]. В срединных и надмерзлотных горизонтах содержание $C_{\text{орг}}$ может достигать нескольких процентов, а в ряде срединных и надмерзлотных горизонтов значения $C_{\text{орг}}/N_{\text{общ}}$ сопоставимы с таковыми в органогенных горизонтах, что является дополнительным свидетельством поступления органического вещества с поверхности вглубь почвенной толщи.

Значения содержания и запасов органического углерода, а также содержания общего азота и соотношения $C_{\text{орг}}/N_{\text{общ}}$ характеризуют пул этих элементов в почвах севера НЗ как относительно благоприятный для функционирования почвенных прокариот и грибов [80]. Для почв НЗ этот ресурсный фактор, видимо, не является в значительной мере лимитирующим так же, как для почв отдельных островов ЗФИ [21]. Ограничения могут быть в большей степени связаны с содержанием доступных форм азота, низкими температурами и неравномерным увлажнением субстрата из-за высокой скелетности. Кроме того, существенное влияние на биологическую активность почв может оказывать высокое содержание карбонатов [13].

Уровень влажности почв севера НЗ существенно разнится от единиц до десятков процентов и для большинства профилей резко уменьшается с глубиной. Это зачастую обусловливается обильным разрастанием мохообразных, имеющих высокую влагоемкость [84].

Большие значения содержания CaCO_3 объясняются развитием почв на карбонатсодержащих породах, которые во многом обуславливают кислотно-основные свойства почв ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 7.1–8.2; pH_{KCl} 6.8–7.9). Кислотность почвенных образцов изменялась в относительно узких пределах в слабощелочном диапазоне. Поэтому можем заключить, что исследованные почвы севера НЗ обладают низкой кислотностью и являются слабо- и среднещелочными. Такие результаты по архипелагу согласуются с литературными данными [3, 19]. Минимальные значения рН отмечены для поверхностных органогенных горизонтов в то время, как большей щелочностью характеризуются

окарбонатные (вскипающие от 10% HCl) срединные горизонты. Однако в случае почвообразования на бескарбонатных породах кислотность сдвигается в нейтральную область, хотя pH может иметь слабощелочные значения, что может быть связано с импัลверизацией солей.

Общая биомасса микроорганизмов в почвах севера НЗ в 2–2.5 раза меньше, чем в органогенных субстратах о. Нортбрук [23] и в 2–4 раза меньше по сравнению с почвами островов Алджер, Ферсмана, Хейса, Гукера и Земля Александры [21] архипелага ЗФИ, который на 3°–5° севернее изученных территорий НЗ [20]. Такое существенное различие можно объяснено тем, что уровень микробной биомассы в почве определяется содержанием и распределением в нем органического вещества [36, 45, 74, 76], что обусловлено абиогенными факторами (см. ниже). Полученные данные по биомассе микроорганизмов почв НЗ почти в 1.5 раза больше по сравнению с почво-грунтами Восточной Антарктиды [17]. Такая информация подтверждает гипотезу о том, что развитие как про-, так и эукариот в условиях Высокой Арктики менее лимитировано абиотическими факторами, чем в Антарктике [59].

Основные запасы микробной биомассы (до 80%) для большинства изученных образцов сосредоточены в поверхностном горизонте так же, как для почв ЗФИ [21, 23] и северной части Таймыра [75]. Предположительно, этот факт может быть объяснен относительно высоким обилием корней, которые могут существенно повышать вокруг себя численность микроорганизмов особенно в почвах бедных питательными веществами [61]. По-другому складывается ситуация в антарктических оазисах без сосудистых растений, то есть без корневых систем. Наибольшее развитие микроорганизмов почв Антарктиды происходит в экранированных от негативных воздействий подповерхностных горизонтах почв и почвоподобных тел [17, 22, 83].

Высокая доля грибов (80–98%) в общей биомассе микроорганизмов для почв севера НЗ характерна и для других почв высокой Арктики и Антарктики [17, 21, 81]. Однако это не означает, что практически всю биологическую активность местных почв обеспечивают грибы.

Таким образом, структура биомассы микроорганизмов в почвенных профилях севера НЗ имеет, как черты сходства с таковой для других высокоширотных областей, так и обладает специфическими особенностями.

Парадоксальность севера НЗ в плане биомассы микроорганизмов заключается в том, что она меньше, чем в почвах расположенной на 3°–5° севернее ЗФИ и ненамного больше, чем в почвах Антарктиды. Мы это связываем с сильным влиянием самого крупного покровного ледника России на

о. Северный НЗ, который оказывает влияние на климат (прежде всего, на ветровой и температурный режим), а также предопределил высокую щебнистость почвообразующих пород. Что полностью соответствует выявленным ранее закономерностям для других областей Высокой Арктики [3, 4]. Конечно, ЗФИ также находится под влиянием современного оледенения. Но в связи с мелкоостровным характером этого архипелага, ледники не образуют крупного единого массива, который бы оказывал такое мощное влияние на прилегающие перигляциальные территории. С позиций концепции экстремального почвоведения [6] почвы ЗФИ можно отнести к клима-экстремальным, а в почвах перигляциальной зоны покровного ледника на севере НЗ проявляется двойная литоклиматическая мультиэкстремальность.

Биомасса прокариот. Численность и биомасса прокариот в различных биотопах НЗ низка, как и в других арктических территориях [10, 23, 21, 74, 75]. Показатели коррелируют с обилием органического углерода в почве, что отмечалось в работах [38, 71]. Полученные значения численности прокариот на порядок меньше по сравнению со значениями для более северной территории ЗФИ [23, 21] и Восточной Антарктиды [17, 22], и на два порядка ниже по сравнению с почвами умеренного климата [25, 39].

Резкое уменьшение биомассы прокариот вниз по профилю изученных почв НЗ характерно и для антарктических почв [17, 24]. Биомасса прокариот в криоземе грубогумусовом остаточно-карбонатном (профиль ВВ-9-10) Бухты Благополучия уменьшается от поверхностного горизонта АОса (1.780 мкг/г почвы) к нижнему СР (0.630 мкг/г почвы), что можно объяснить сокращением уровня кислорода, необходимого для метаболизма аэробных бактерий и архей [72].

Длина мицелия актиномицетов в исследованных почвах севера НЗ на порядок меньше, чем для ЗФИ [21], но доля представителя данного порядка грамположительных бактерий относительно велика для полярных экосистем [10, 65]. Вероятно, длина мицелия актиномицетов коррелирует с генетическими особенностями почвенных профилей и распределением в них органического вещества [46]. Доля актиномицетного мицелия резко возрастает с глубиной от 6.3 в АОса до 46.1% в СР для профиля криозема грубогумусового остаточно-карбонатного профиля ВВ-9-10 района Бухты Благополучия; а в единственном горизонте W + Сса пелозема гумусового остаточно-карбонатного среднескелетного (профиль ВВ-8) весьма велика 34.1%. Развитие актиномицетов в срединных горизонтах может быть связано с их адаптацией к олиготрофным условиям [8, 36], а также со стремлением избежать жестких климатических

факторов, проявляющихся более явно в верхних горизонтах [46, 83].

Подробно рассмотрена структура прокариотной биомассы для каждого из изученных районов севера НЗ из-за специфичности почвенно-экологических и климатических условий в каждом из них [3, 4]. Почвы мыса Желания беднее прокариотами, чем остальные исследованные территории. Средняя биомасса прокариот на образец здесь составляет лишь 0.313 мкг/г почвы, несмотря на наличие над криоземом остаточно-карбонатным сильноскелетным (профиль CJ-22-23) обильного мохового оцеса, обычно содержащего много бактерий [8, 17]. Криозем глееватый скелетный Русской Гавани (профиль RG-1-3) имеет два максимума прокариотной биомассы – в подстильно-торфяном горизонте O (1.628 мкг/г почвы) и наиболее глубоком горизонте CRg (1.286 мкг/г почвы). Вероятно, из-за активной миграции микроорганизмов по профилю вместе с растворами в вегетационный сезон и последующей задержкой на мерзлотном водоупоре [30].

Биомасса грибов. Из-за разнообразия эколого-географических условий исследованных территорий [20] запасы и структура биомассы грибов в почвах севера НЗ варьируют в широких пределах. Минимальные значения сходны, а максимальные примерно в 8 раз меньше по сравнению с таковыми для почв ЗФИ [21, 23], видимо, из-за локально более сурового климата и преобладания сильноскелетных горных пород, обедненных биогенными элементами [15], обусловленных влиянием крупнейшего ледника России. Биомасса микобиоты в изученных почвенных профилях Ледяной Гавани, мыса Желания и Бухты Благополучия резко уменьшается от поверхностных горизонтов к глубинным, что типично для многих зональных почв, как высоких [74], так и средних широт [34]. Такое распределение может быть обусловлено активным развитием эккрисотрофной микобиоты в зоне ризоидов мхов и около лишайников [51]. Однако для профилей района Русской Гавани (RG-1-3 и RG-5-6) биомасса грибов, наоборот, возрастает с увеличением глубины, что характерно для почв оазисов Восточной Антарктиды, где большая часть микобиоты развивается в подповерхностных горизонтах [17, 22]. Полагаем, это связано с миграцией органического вещества из верхних горизонтов в нижние из-за большей щебнистости грунтов [30] или криотурбаций [58] по сравнению с другими рассмотренными районами.

Мицелий – важный компонент грибной биомассы, на долю которого приходится до 100% содержания грибов в почвах [53, 56]. Тем не менее, один из изученных подповерхностных горизонтов профиля пелозема перегнойно-гумусового остаточно-карбонатного сильноскелетного (LG-15-17)

не содержал гиф микобиоты. Это свидетельствует об угнетенном состоянии данной группы микроорганизмов в олиготрофных условиях минеральных горизонтов высокоарктических почв, что подтверждается наблюдениями для высокоарктических пустошей ЗФИ [21].

Около 65% мицелия грибов представлено тонким мицелием до 3 мкм в диаметре, что, вероятно, является следствием воздействия сурового климата [22]. Не обнаружены пряжки на мицелии грибов, что косвенно может свидетельствовать о низком содержании в этих арктических почвах отдела *Basidiomycota* и подтверждается другими исследователями [53]. Не выявлены ризоморфы и склероции, которые могли разрушиться на отдельные гифы при механической обработке почвенных образцов на вортексе.

Грибные споры, обнаруженные в исследованных образцах, мелкие (диаметром 2–3 мкм), что характерно для биотопов с экстремальными условиями [17, 82]. Преобладание пропагул столь малых размеров обычно связано с экстремальными условиями полярного климата и выявлено для других высокоширотных территорий [17]. Форма грибных спор является маркером, по которому можно определить принадлежность микобиоты к тому или иному таксону [14, 53, 55], однако не выявлены пропагулы специфической морфологии.

Биологическая активность. Поскольку распределение биомассы прокариот по изученным почвенным профилям существенно отличается от пиков эмиссии CO₂, предполагаем, что основной вклад в базальное и СИД вносят грибы [34]. Интенсивность эмиссии резко уменьшается от поверхностных органогенных к срединным минеральным горизонтам, что может быть связано, как с уменьшением доступности кислорода [72], низким содержанием углерода [74], а также обилием карбонатов кальция в нижних горизонтах. Для органогенных горизонтов разница значений базального дыхания и СИД составляет 3–5 раз, а для минеральных горизонтов – до порядка. Можно предположить, что одним из факторов, лимитирующих развитие почвенного микробиома в высокоарктических биогеоценозах, является низкий уровень содержания доступных форм органического вещества [38, 45, 70, 75]. По сравнению с другими полярными областями эмиссия CO₂ из почвенных горизонтов севера НЗ на 2 порядка больше (для органогенных горизонтов), чем из максимально биогенных гиполитных альго-бактериальных горизонтов каменных мостовых Антарктиды [17, 22]. Это косвенно подтверждает гипотезу о большей продуктивности экосистем Арктики по сравнению с Антарктикой [59]. Полученные в нашем исследовании значения СИД в органогенных горизонтах близки к данным для субарктической тундры Швеции [50]. Для некоторых изученных

органогенных горизонтов интенсивность базального дыхания сопоставима по порядку с таковой даже для подстилочно-торфяных горизонтов почв Центральной Сибири [48].

Максимальная интенсивность эмиссии CH_4 отмечена в моховых подстилочно-торфяных горизонтах, где самая большая численность и биомасса прокариот, судя по методу люминесцентной микроскопии. Во мхах различных регионов мира зачастую активно развиваются метаногены [41]. Полученные в нашем исследовании значения эмиссии CH_4 сопоставимы с данными для автотрофных участков полигональной тундры севера Аляски [66] и других высокоширотных регионов [57]. Выявлена положительная корреляция между уровнем органического вещества и влажностью образцов с интенсивностью процесса метаногенеза, что подтверждается литературными данными для некоторых тундровых почв [35, 64, 69].

В Восточной Антарктиде минимальная денитрификация более чем на порядок меньше, чем в исследованных почвах НЗ, однако максимальная в 2–3 раза больше [17, 22]. Такая разница может быть объяснена, с одной стороны, сильным стимулирующим влиянием корневой системы растений на почвенный микробиом в Арктических экосистемах [61], а, с другой, присутствием мощного слоя оторфованного органического вещества в рассматриваемой антарктической почве [17, 22]. Судя по большинству опубликованных данных по эмиссии N_2O из почв шестого континента [17, 22], уровень потенциальной денитрификации, как на севере НЗ, так и для гиполитных альго-бактериальных горизонтов каменных мостовых Антарктиды примерно одинаков. Полученные результаты для органогенных горизонтов близки к данным для оторфованных почв европейской части Российской Субарктики [82]. Отмечено, что интенсивность денитрификации положительно коррелирует с уровнем влажности и содержанием азота в почве, что показано в других исследованиях [67].

Таким образом, показатели биологической активности почв, определенные газохроматографическими методами, сходны с данными для почв Высокой Арктики [57], Восточной Антарктиды и значительно меньше, обычно регистрируемых для умеренного климата [31]. Максимальные значения интенсивности процессов эмиссии CO_2 , CH_4 и N_2O выявлены для поверхностных органогенных горизонтов, представленных, преимущественно мохово-лишайниковым покровом, а также в горизонтах, более насыщенных влагой, обогащенных органическим углеродом и имеющих значительную биомассу микроорганизмов. Полученные результаты позволяют предположить, что микробные сообщества почв севера НЗ в течение вегетационного сезона способны вносить суще-

ственный вклад в эмиссию парниковых газов атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвенный покров северной части о. Северный архипелага НЗ (мыс Желания, Ледяная Гавань, Русская Гавань, Бухта Благополучия) имеет мозаичное строение, которое определяется не столько широтным положением районов, сколько сложившимися на них местными условиями. Большинство почвенных разностей и структур почвенного покрова более характерны для высокоарктических (тундро)пустошей, чем для арктических пустынь.

В то же время характерной особенностью почв различных биотопов севера НЗ является низкая микробная биомасса и биологическая активность (базальное и СИД, метаногенез и денитрификация). Численность прокариот, будучи на два порядка меньше по сравнению с почвами умеренного климата, оказалась на порядок ниже, чем в почвах высокоарктических тундр архипелага Земля Франца-Иосифа и даже некоторых почвах оазисов Восточной Антарктиды.

Из-за разнообразия эколого-географических условий севера НЗ, запасы и структура биомассы грибов в почвах варьируют в широких пределах. Минимальные значения сходны, а максимальные примерно в 8 раз меньше по сравнению с таковыми для почв высокоарктических тундр архипелага Земля Франца-Иосифа, что наиболее вероятно связано с составом почвообразующих пород и локально более неблагоприятными климатическими условиями. Для большинства исследованных почв доля мицелия в грибной биомассе составляет менее половины. Основная масса грибных спор и мицелия представлена мелкими формами с размерами от 2 до 3 мкм. Доля микобиоты в общей микробной биомассе значительно превышает долю прокариот, что характерно для многих других почв высокой Арктики, континентальной Антарктики, а также умеренного пояса.

Все параметры биологической активности изученных почв резко снижаются вниз по профилю, что положительно коррелирует с содержанием органического вещества, углерода и азота.

По совокупности изученных показателей биологическая активность почв севера НЗ меньше по сравнению с почвами высокоарктических тундр расположенного на 3° – 5° севернее архипелага ЗФИ и больше, чем в почвах оазисов Восточной Антарктиды. Это обусловлено влиянием самого крупного покровного ледника России на о. Северный НЗ и связанных с ним выводящими ледниками, превращающими перигляциальную зону в цепь оазисов с разреженным почвенно-растительным покровом и повсеместным развитием

каменных мостовых из-за выдувания мелкозема сильнейшими ветрами. Ледник обусловил высокую щебнистость почвообразующих пород и создает жесткий ветровой и температурный режим для почв северной части НЗ. Это приводит к литоклиматической мультиэкстремальности местных почв, что и обуславливает пониженные почвенно-биологические параметры. Таким образом, как и в Южном полушарии, покровное оледенение в Арктике оказывает существенное влияние на почвенно-географические закономерности.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят проект “Арктический плавучий университет” САФУ им. М.В. Ломоносова и лично К.С. Зайкова за организацию полевых работ на Новой Земле. Также выражают признательность младшему научному сотруднику Института географии РАН А.В. Почикалову за определение содержания углерода и азота в почве.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-04-00328 (проведение микробиологических анализов), в рамках темы государственного задания № 0148-2019-0006 (проведение физико-химических анализов, расчет запасов углерода, классификация и диагностика почв), а также при поддержке проекта РНФ № 20-17-00212 (анализ влияния покровного ледника на почвообразование в перигляциальной зоне).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова Е* Растительность полярных пустынь СССР. Л.: Наука, 1983. 142 с.
2. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е.* Арктические и тундровые почвы на новой цифровой почвенной карте России масштаба 1 : 2.5 млн // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. № 101. С. 46–75.
3. *Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
4. *Горячкин С.В., Караваяева Н.А., Таргульян В.О.* География почв Арктики: современные проблемы // Почвоведение. 1998. № 5. С. 520–530.
5. *Горячкин С.В., Любова С.В., Левандовская Т.В.* Почвенно-геохимические особенности береговых и островных геосистем в экстремальных условиях Арктики // Комплексная научно-образовательная экспедиция “Арктический плавучий университет–2015”: материалы экспедиции САФУ. 2015. С. 35–59.
6. *Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О.* Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. № 1. С. 5–19.
7. *Грищенко И.В.* Климат // Новая Земля. М.: Европейские издания – Paulsen, 2009. С. 307–311.
8. *Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Звягинцев Д.Г.* Анализ экологических факторов, ограничивающих деструкцию верхового торфа // Почвоведение. 2014. № 3. С. 304–316. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14030046>
9. *Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М.* Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1096. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>
10. *Дуброва М.С., Лубсанова Д.А., Макарова Е.П., Кожевин П.А., Манучарова Н.А., Зенова Г.М.* Психротолерантные актиномицеты в почвах тундры и северной тайги // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2011. № 2. С. 3–8.
11. *Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 60 с.
12. *Злобин Ю.А.* Принципы и методы изучения ценологических популяций растений. Казань, 1989. 147 с.
13. *Казеев К.Ш., Кутровский М.А., Даденко Е.В., Везденеева Л.С., Колесников С.И., Вальков В.Ф.* Влияние карбонатности пород на биологические свойства горных почв Северо-Западного Кавказа // Почвоведение. 2012. № 3. С. 327–327.
14. *Кирицели И.Ю., Власов Д.Ю., Баранцевич Е.П., Крыленков В.А., Соколов В.Т.* Комплексы микроскопических грибов в почвах и грунтах полярного острова Известий ЦИК (Карское море) // Микология и фитопатология. 2014. № 48(6). С. 365–371.
15. *Крупская В.В., Мирошников А.Ю., Доржиева О.В., Закусин С.В., Семенов И.Н., Усачева А.А.* Минеральный состав почв и донных осадков заливов архипелага Новая Земля // Океанология. 2017. № 57(1). С. 238–245.
16. *Кулиев А.Н.* Растительность // Новая Земля. М.: Европейские издания–Paulsen, 2009. С. 334–349.
17. *Лысак Л.В., Максимова И.А., Никитин Д.А., Иванова А.Е., Кудинова А.Г., Соина В.С., Марфенина О.Е.* Микробные сообщества почв Восточной Антарктиды // Вестник Моск. ун-та. Сер. 16. Биология. 2018. Т. 73. № 3. С. 132–140.
18. *Манучарова Н.А.* Молекулярно-биологические аспекты исследований в экологии и микробиологии. 2010.
19. *Мирошников А.Ю., Лаверов Н.П., Чернов Р.А., Кудинов А.В., Усачева А.А., Семенов И.Н., Алиев Р.А., Асадуллин Эн Э., Гаврило М.В.* Радиоэкологические исследования на севере архипелага Новая Земля // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 227–237
20. *Мосеев Д.С., Сергиенко Л.А.* К флоре островов архипелага Земля Франца-Иосифа и северной части архипелага Новая Земля (аннотированный список видов) // Ученые записки Петрозаводского гос. ун-та. 2017. № 4. 165 с.

21. Никитин Д.А., Лысак Л.В., Мергелов Н.С., Долгих А.В., Зазовская Э.П., Горячкин С.В. Микробная биомасса, запасы углерода и эмиссия CO₂ в почвах Земли Франца-Иосифа: высокоарктические тундры или полярные пустыни? // Почвоведение. 2020. № 4. С. 1–19.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20040115>
22. Никитин Д.А., Марфенина О.Е., Кудинова А.Г., Лысак Л.В., Мергелов Н.С., Долгих А.В., Луначев А.В. Микробная биомасса и биологическая активность почв и почвоподобных тел береговых оазисов Антарктиды // Почвоведение. 2017. № 9. С.1122–1133.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17070073>
23. Никитин Д.А., Семенов М.В., Семиколенных А.А., Максимова И.А., Качалкин А.В., Иванова А.Е. Биомасса грибов и видовое разнообразие культивируемой микробиоты почв и субстратов о. Нортбрук (Земля Франца-Иосифа) // Микология и фитопатология. 2019. № 53(4). С. 210–222.
<https://doi.org/10.1134/S002636481904010X>
24. Никитин Д.А., Семенов М.В., Тхакахова А.К., Железова А.Д., Бгажба Н.А., Кутлова О.В. Численность копий рибосомальных генов микробиоты в почвах и почвоподобных телах Земли Франца-Иосифа и Новой Земли // Комплексная научно-образовательная экспедиция “Арктический плавучий университет – 2017”. Архангельск: КИРА, 2017. С. 35–39.
25. Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г. Содержание и структура микробной биомассы как показатели экологического состояния почв // Почвоведение. 2005. № 6. С. 706–714.
26. Полянская Л.М., Пинчук И.П., Степанов А.Л. Сравнительный анализ методов люминесцентной микроскопии и каскадной фильтрации для оценки численности и биомассы бактерий в почве: роль разведения почвенной суспензии // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1216–1219.
27. Семенов И.Н. Физико-географическая характеристика архипелага Новая Земля (литературный обзор). 2020.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15583.20642>
28. Семенов В.М., Тулина А.С., Семенова Н.А., Иванникова Л.А. Гумификационные и негумификационные пути стабилизации органического вещества в почве (обзор) // Почвоведение. 2013. № 4. С. 393–393.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X13040114>
29. Смирнов И.П. Динамика прибрежных ландшафтов на северо-востоке острова Северный архипелага Новая Земля // Известия Русского географического общества. 2015. Т. 147. Вып. 3. С. 30–41.
30. Соина В.С., Мергелов Н.С., Кудинова А.Г., Лысак Л.В., Демкина Е.В., Воробьева Е.А., Долгих А.В., Шоркунов И.Г. Исследования микробных сообществ почв и почвоподобных тел в экстремальных условиях Антарктиды. М., 2017. С. 149–168.
31. Степанов А.Л., Лысак Л.В. Методы газовой хроматографии в почвенной микробиологии. М.: МАКС Пресс, 2003. С. 151.
32. Холод С.С. Растительность в окрестностях мыса Желания (остров Северный архипелага Новая Земля) // Растительность России. 2020. № 38. С. 85–138.
<https://doi.org/10.31111/vegrus/2020.38.85>
33. Шахин Д.А. Обзор растительного покрова западного побережья Новой Земли // Новая Земля. Природа. История. Археология. Культура: Тр. Морской арктической комплексной экспедиции (МАКЭ). М., 1992. Вып. III(2). С. 98–124.
34. Ananyeva N.D., Castaldi S., Stolnikova E.V., Kudryarov V.N., Valentini R. Fungi-to-bacteria ratio in soils of European Russia // Arch. Agronomy Soil Sci. 2015. V. 61(4). P. 427–446.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2014.940916>
35. Arndt K.A., Oechel W.C., Goodrich J.P., Bailey B.A., Kalhori A., Hashemi J., Sweeney C., Zona D. Sensitivity of methane emissions to later soil freezing in Arctic tundra ecosystems // J. Geophys. Res.: Biogeosciences. 2019. V. 124(8). P. 2595–2609.
<https://doi.org/10.1029/2019JG005242>
36. Baldrian P. The known and the unknown in soil microbial ecology // FEMS microbiology ecology. 2019. V. 95(2). P. fiz005.
<https://doi.org/10.1093/femsec/fiz005>
37. Ball B.A., Virginia R.A. Microbial biomass and respiration responses to nitrogen fertilization in a polar desert // Polar Biol. 2014. V. 37(4). P. 573–585.
<https://doi.org/10.1007/s00300–014-1459-0>
38. Bakermans C., Emili L.A. Terrestrial systems of the Arctic as a model for growth and survival at low temperatures // Model Ecosystems in Extreme Environments. Academic Press, 2019. P. 1–21.
<https://doi.org/10.1016/B978-0–12–812742–1.00001-5>
39. Bloem J., Hopkins D.W., Benedetti A. (Eds.). Microbiological methods for assessing soil quality. CABI, 2005.
40. Boyd W.L. Microbiological studies of arctic soils // Ecology. 1958. V. 39(2). P. 332–336.
<https://doi.org/10.2307/1931879>
41. Bräuer S., Basiliko N., Siljanen H., Zinder S. Methanogenic archaea in peatlands // FEMS Microbiol. Lett. 2020.
<https://doi.org/10.1093/femsle/fnaa172>
42. Bridge P.D., Spooner B.M. Non-lichenized Antarctic fungi: transient visitors or members of a cryptic ecosystem? // Fungal Ecol. 2012. V. 5(4). P. 381–394.
<https://doi.org/10.1016/j.funeco.2012.01.007>
43. Chernov T.I., Tkhakakhova A.K., Lebedeva M.P., Zhelezova A.D., Bgazhba N.A., Kutovaya O.V. Microbiomes of the Soils of Solonchak Complex with Contrasting Salinization on the Volga–Ural Interfluvium // Euras. Soil Sci. 2018. V. 51(9). P. 1057–1066.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318090041>
44. Cox F., Newsham K.K., Bol R., Dungait J.A., Robinson C.H. Not poles apart: Antarctic soil fungal communities show similarities to those of the distant Arctic // Ecology Lett. 2016. V. 19(5). P. 528–536.
<https://doi.org/10.1111/ele.12587>
45. Darrouzet-Nardi A., Steltzer H., Sullivan P.F., Segal A., Koltz A.M., Livenessperger C. et al. Limited effects of early snowmelt on plants, decomposers, and soil nutrients in Arctic tundra soils // Ecology Evolution. 2019. V. 9(4). P. 1820–1844.
<https://doi.org/10.1002/ece3.4870>
46. Fischer T. Humic supramolecular structures have polar surfaces and unpolar cores in native soil // Chemosphere. 2017. V. 183. P. 437–443.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.125>
47. Flocco C.G., Mac Cormack W.P., Smalla K. Antarctic Soil Microbial Communities in a Changing Environment: Their Contributions to the Sustainability of Antarctic Ecosystems and the Bioremediation of Anthro-

- pogenic Pollution // The Ecological Role of Micro-organisms in the Antarctic Environment. 2019. V. 2. P. 133–161.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-02786-5_7
48. *Grodnitskaya I.D., Karpenko L.V., Knorre A.A., Syrtsov S.N.* Microbial activity of peat soils of boggy larch forests and bogs in the permafrost zone of central Evenkia // *Euras. Soil Sci.* 2013. V. 46(1). P. 61–73.
<https://doi.org/10.1134/S1064229313010043>
 49. *Handelsman J.* Metagenomics: application of genomics to uncultured microorganisms // *Microbiol. Molecular Biol. Rev.* 2004. V. 68(4). P. 669–685.
<https://doi.org/10.1128/MMBR.69.1.195.2005>
 50. *Hartley I.P., Hopkins D.W., Garnett M.H., Sommerkorn M., Wookey P.A.* Soil microbial respiration in arctic soil does not acclimate to temperature // *Ecol. Lett.* 2008. V. 11. P. 1092–1100.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01223.x>
 51. *Hassan N., Rafiq M., Hayat M., Shah A.A., Hasan F.* Psychrophilic and psychrotrophic fungi: a comprehensive review // *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 2016. V. 15(2). P. 147–172.
<https://doi.org/10.1007/s11157-016-9395-9399>
 52. *Isbell F., Craven D., Connolly J., Loreau M., Schmid B., Beierkuhnlein C. et al.* Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes // *Nature.* 2015. V. 526(7574). P. 574.
<https://doi.org/10.1038/nature15374>
 53. *Islam M.R., Tudryn G., Bucinell R., Schadler L., Picu R.C.* Morphology and mechanics of fungal mycelium // *Scientif. Rep.* 2017. V. 7(1). P. 1–12.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-20637-1>
 54. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
 55. *Kavanagh K.* Fungi: biology and applications. John Wiley & Sons, 2017.
 56. *Kaviya N., Upadhayay V.K., Singh J., Khan A., Panwar M., Singh A.V.* Role of Microorganisms in Soil Genesis and Functions // *Mycorrhizosphere and Pedogenesis.* 2019. P. 25–52.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-6480-8_2
 57. *Li F., Zhu R., Bao T., Wang Q., Xu H.* Sunlight stimulates methane uptake and nitrous oxide emission from the High Arctic tundra // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 572. P. 1150–1160.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.026>
 58. *Lu Y., Liu S.* Cracking in an expansive soil under freeze–thaw cycles // *Sciences in Cold and Arid Regions.* 2018. V. 9(4). P. 392–397.
 59. *Makhalanyane T.P., Valverde A., Velázquez D., Gunzige E., Van Goethem M.W., Quesada A., Cowan D.A.* Ecology and biogeochemistry of cyanobacteria in soils, permafrost, aquatic and cryptic polar habitats // *Biodiversity and Conservation.* 2015. V. 24(4). P. 819–840.
<https://doi.org/10.1007/s10531-015-0902-z>
 60. *Malard L.A., Pearce D.A.* Microbial diversity and biogeography in Arctic soils // *Environ. Microbiol. Rep.* 2018. V. 10(6). P. 611–625.
<https://doi.org/10.1111/1758-2229.12680>
 61. *Mapelli F., Marasco R., Fusi M., Scaglia B., Tsiamis G., Rolli E., Fodelianakis S., Bourtzis K., Ventura S., Tambone F., Adani F., Borin S., Daffonchio D.* The stage of soil development modulates rhizosphere effect along a High Arctic desert chronosequence // *ISME J.* 2018. V. 12(5). P. 1188–1198.
<https://doi.org/10.1038/s41396-017-0026-4>
 62. *Martin R., Sebastian L., Nicole S., Burkhard B.* Biodiversity of biological soil crusts from the Polar Regions revealed by metabarcoding // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2018.
<https://doi.org/10.1093/femsec/fiy036>
 63. *Mazei Y.A., Tsyganov A.N., Chernyshov V.A., Ivanovsky A.A., Payne R.J.* First records of testate amoebae from the Novaya Zemlya archipelago (Russian Arctic) // *Polar Biol.* 2018. V. 41(6). P. 1133–1142.
<https://doi.org/10.1007/s00300-018-2273-x>
 64. *Merkel A.* Molecular ecology of methanogenic and methanotrophic archaea in hydrothermal habitats. 2015.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2678.2561>
 65. *Millán-Aguñaga N., Soldatou S., Brozjo S., Munnoch J.T., Howe J., Hoskisson P.A., Duncan K.R.* Awakening ancient polar Actinobacteria: diversity, evolution and specialized metabolite potential // *Microbiology.* 2019. V. 165(11). P. 1169–1180.
<https://doi.org/10.1099/mic.0.000845>
 66. *Morrissey L.A., Livingston G.P.* Methane emissions from Alaska Arctic tundra: An assessment of local spatial variability // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97(D15). P. 16661–16670.
<https://doi.org/10.1029/92JD00063>
 67. *Nadeau S.A., Roco C.A., Debenport S.J., Anderson T.R., Hofmeister K.L., Walter M.T., Shapleigh J.P.* Metagenomic analysis reveals distinct patterns of denitrification gene abundance across soil moisture, nitrate gradients // *Environ. Microbiol.* 2019. V. 21(4). P. 1255–1266.
<https://doi.org/10.1111/1462-2920.14587>
 68. *Oechel W.C., Vourliitis G., Hastings S.J.* Cold season CO₂ emission from arctic soils // *Global Biogeochem. Cycles.* 1997. V. 11(2). P. 163–172.
<https://doi.org/10.1029/96GB03035>
 69. *Oh Y., Zhuang Q., Liu L., Welp L.R., Lau M.C., Onstott T.C. et al.* Reduced net methane emissions due to microbial methane oxidation in a warmer Arctic // *Nature Climate Change.* 2020. V. 10(4). P. 317–321.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0734-z>
 70. *Pastor A., Freixa A., Skovsholt L.J., Wu N., Romani A.M., Riis T.* Microbial Organic Matter Utilization in High-Arctic Streams: Key Enzymatic Controls // *Microbiol. Ecol.* 2019. V. 78(3). P. 539–54.
<https://doi.org/10.1007/s00248-019-01330-w>
 71. *Paukkunen J., Kozlov M.V.* Stinging wasps, ants and bees (Hymenoptera: Aculeata) of the Nenets Autonomous Okrug, northern Russia // *Annales Zoologici Fennici. Finnish Zoological and Botanical Publishing Board.* 2020. V. 57(1–6). P. 115–128.
<https://doi.org/10.5735/086.057.0112>
 72. *Rusakov A., Makeev A., Khokhlova O., Kust P., Lebedeva M., Chernov T., Golyeva A., Popova A., Kurbanova F., Puzanova T.* Paleoenvironmental reconstruction based on soils buried under Scythian fortification in the southern forest-steppe area of the East European Plain // *Quatern. Int.* 2019. V. 502. P. 197–217.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.05.016>
 73. *Russel T.K.* Microbial Biomass: A Paradigm Shift. Terrestrial Biogeochemistry. World Scientific, 2017.

74. *Santruckova H., Kotas P., Barta J., Urich T., Capek P., Palmtag J. et al.* Significance of dark CO₂ fixation in arctic soils // *Soil Biol. Biochem.* 2018. V. 119. P. 11–21.
75. *Schmidt N., Bölter M.* Fungal and bacterial biomass in tundra soils along an arctic transect from Taimyr Peninsula, central Siberia // *Polar Biol.* 2002. V. 25(12). P. 871–877.
<https://doi.org/10.1007/s00300-002-0422-7>
76. *Semenov M.V., Chernov T.I., Tkhakakhova A.K., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Kolganova T.V., Kutovaya O.V.* Distribution of prokaryotic communities throughout the Chernozem profiles under different land uses for over a century // *Appl. Soil Ecol.* 2018. V. 127. P. 8–18.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.03.002>
77. *Shivaji S., Chattopadhyay M.K., Reddy G.S.* Diversity of Bacteria from Antarctica, Arctic, Himalayan Glaciers and Stratosphere // *Proceedings of the Indian National Science Academy.* 2019. V. 85(4). P. 909–923.
<https://doi.org/10.16943/ptinsa/2019/49717>
78. *Sikorski J.* The prokaryotic biology of soil // *Soil Organisms.* 2015. V. 87(1). P. 1–28.
79. *Singh J.S., Gupta V.K.* Soil microbial biomass: a key soil driver in management of ecosystem functioning // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 634. P. 497–500.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.373>
80. *Soong J.L., Fuchslueger L., Marañon-Jimenez S., Torn M.S., Janssens I.A., Penuelas J., Richter A.* Microbial carbon limitation: The need for integrating microorganisms into our understanding of ecosystem carbon cycling // *Global Change Biol.* 2020. V. 26(4). P. 1953–1961.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14962>
81. *Sterflinger K., Tesei D., Zakharova K.* Fungi in hot and cold deserts with particular reference to microcolonial fungi // *Fungal Ecology.* 2012. V. 5(4). P. 453–462.
<https://doi.org/10.1016/j.funeco.2011.12.007>
82. *Voigt C., Lamprecht R.E., Marushchak M.E., Lind S.E., Novakovskiy A., Aurela M., Martikainen P.J., Biasi C.* Warming of subarctic tundra increases emissions of all three important greenhouse gases – carbon dioxide, methane, and nitrous oxide // *Glob Change Biol.* 2017. V. 23. P. 3121–3138.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13563>
83. *Wei S.T., Lacap-Bugler D.C., Lau M.C., Caruso T., Rao S., de Los Rios A. et al.* Taxonomic and functional diversity of soil and hypolithic microbial communities in Miers Valley, McMurdo Dry Valleys, Antarctica // *Frontiers in Microbiology.* 2016. V. 7. P. 1642.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01642>
84. *Xiao B., Hu K.* Moss-dominated biocrusts decrease soil moisture and result in the degradation of artificially planted shrubs under semiarid climate // *Geoderma.* 2017. V. 291. P. 47–54.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.009>
85. *Zazovskaya E., Mergelov N., Shishkov V., Dolgikh A., Turchinskaya S., Karelin D., Goryachkin S.* Cryocoinites – as a source of carbon for soils and soil-like bodies of High latitudes // International Conference “Solving the puzzles from Cryosphere”. Program, Abstracts. Pushchino, Russia, April 15–18, 2019. P. 186–187.

Biological Activity of Soils in the North of Novaya Zemlya Archipelago: Effect of The Largest Glacier in Russia

D. A. Nikitin^{1,4,*}, L. V. Lysak², D. V. Badmadashiev², S. S. Kholod³,
N. S. Mergelov⁴, A. V. Dolgikh⁴, and S. V. Goryachkin⁴

¹ Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

³ Komarov Botanical Institute Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 197376 Russia

⁴ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: dimnik90@mail.ru

The vegetation cover, chemical and physical properties of strongly skeletal residual carbonate pelozems (Skeletal Leptosols (Loamic), carbopetrozems (Calcaric Leptosols (Protic)), petrozems (Skeletal Leptosols (Protic)) and cryozems (Oxyaquic Cryosols (Loamic)) in the northern part of Novaya Zemlya archipelago. The reserves and structure of microbial biomass, the intensity of CO₂ (basal and substrate-induced respiration), CH₄ (methanogenesis) and N₂O (denitrification) emissions in the soil samples of the indicated territories were determined. The biomass of microorganisms (prokaryotes and fungi in total) varied from 22.50 to 390.18 µg/g soil. The share of mycobiota in the microbial biomass ranged from 80 to 98%. Most of the microbial biomass (up to 50%) is concentrated in the surface horizons. The number of prokaryotes range from 1.5 × 10⁷ to 9.66 × 10⁸ cells/g soil, and the biomass of fungi varies from 22 to 372 µg/g soil. The length of the actinomycete mycelium is small - from 0.6 to 23.5 m/g of soil, and fungal hyphae – an order of magnitude higher (up to 166 m/g of soil). All parameters of the biological activity of the studied soils sharply decrease down the profile, which positively correlates with the content of organic matter, carbon and nitrogen. In general, the values of the studied indicators of the biological activity of soils in the north of Novaya Zemlya are lower than in soils located 3–5 degrees to the north at Franz Josef Land. This phenomenon is related to the effect of the largest glacier in Russia on the soil and vegetation cover of the adjacent territory.

Keywords: Arctic, extreme ecosystems, glacier periglacial zone, biomass of microorganisms, prokaryotes, fungi, basal respiration, substrate-induced respiration, methanogenesis, denitrification