

УДК 004.9:631.4

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ROMUL ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ CO₂ И ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЛИТОЗЕМОВ СУБАНТАРКТИКИ

© 2022 г. М. А. Надпорожская^а*, С. С. Быховец^б, Е. В. Абакумов^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^бИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения ФИЦ ПНЦБИ РАН,
ул. Институтская, 2, Пущино, Московская обл., 142290 Россия

*e-mail: m.nadporozhskaya@spbu.ru

Поступила в редакцию 24.09.2021 г.

После доработки 29.11.2021 г.

Принята к публикации 30.11.2021 г.

Методами математического моделирования анализировали особенности формирования системы поверхностных биологически активных горизонтов (органопрофиля) в литоземах Субантарктики. Имитационные эксперименты проводили с математической моделью ROMUL. Рабочие сценарии компилировали с учетом особенностей влияния климата, животного мира и растительности побережий о. Кинг-Джордж, архипелага Южные Шетландские острова, Западная Антарктика. Детальность учета температуры (использование среднесуточных или среднемесячных значений) слабо влияет на результаты расчетов. Показано, что разная локализация опада под зелеными мхами и щучкой антарктической (*Deschampsia antarctica*) формирует различные по структуре органопрофили. Обогащение азотом за счет жизнедеятельности пингвинов повышает интенсивность трансформации опада и усиливает гумификацию, при этом результаты среднесрочной (50-летней) имитации динамики запасов органического вещества литоземов с разной орнитогенной нагрузкой начинают существенно различаться при смене типа растительности и увеличении концентрации азота в опаде. Долгосрочные (при постоянных климате и опаде) вычислительные эксперименты показали, что стабилизация запасов подстилок и гумуса в условиях Субантарктики происходит через 200 и 500 лет соответственно. Почвенную эмиссию CO₂ в моделируемых диапазонах факторов почвообразования можно считать соответствующей результатам полевых измерений при условии, что большая часть валового потока обеспечена дыханием растительного покрова. На этапе подготовки сценариев для имитационных экспериментов выявлен дефицит информации о качестве и запасах поверхностного органического горизонта (подстилки) для дренированных антарктических почв. Необходим учет подстилки как одного из важных индикаторов актуального отклика почв Антарктики на изменение факторов почвообразования. Предлагаем международному сообществу ученых, изучающих почвы Антарктиды, договориться об унификации описаний ключевых участков.

Ключевые слова: Leptosols, зеленые мхи, щучка антарктическая, орнитогенный фактор

DOI: 10.31857/S0032180X22040128

ВВЕДЕНИЕ

В Антарктике выделены четыре почвенно-климатические зоны: субантарктическая тундра (север Антарктического полуострова и субантарктические острова), низкоантарктическая тундропустошь (береговой эоклиматический район и южная часть Антарктического полуострова), среднеантарктическая тундропустошь и антарктическая холодная пустыня (континентальная Антарктика) [2, 13]. Почвы субантарктической и антарктической береговых зон характеризуются значительными запасами лабильного органического вещества, консервация которого обеспечена крат-

ким вегетационным периодом и невысокой биологической активностью [1, 9, 11, 46]. Профильное распределение и качество почвенного органического вещества (ПОВ) – индикаторы среднесрочных (десятки лет) изменений факторов среды – в Антарктике изучены недостаточно [36, 48]. Для оценок запасов ПОВ не хватает данных по разным районам южной циркумполярной области. Экстра-мозаичность почвенно-растительного покрова северных морских побережий Антарктики в значительной степени затрудняет экологические мониторинговые работы. Методология картографирования, диагностики и классификации полярных почв еще только разрабатывается [41].

Потепление климата может вызвать быстрое изменение экосистем в субантарктической зоне, в первую очередь будет меняться ПОВ. Для определения отклика почв на актуальное варьирование факторов почвообразования необходимы как ревизия накопленных материалов по изучению почв Субантарктики в целом, так и детальный анализ динамики ПОВ как результата процессов минерализации мортмассы и аккумуляции гумусовых веществ. Почвенные математические модели являются общепризнанным инструментом для анализа и прогноза экологического состояния почв. Методами математического моделирования можно проверить полноту и корректность первичных данных, а затем выполнить анализ динамики ПОВ, определяемой количеством и качеством поступающего опада в специфических условиях трансформации (температуры, влажности, физико-химических свойств почв и влияния биоты). В качестве расходной статьи баланса ПОВ обычно рассчитывают эмиссию CO_2 в атмосферу [18, 23].

Особенности тундрового почвообразования при доминирующем влиянии абиогенных факторов исключают использование моделей углеродного бюджета, построенных на данных полевых исследований в других природных зонах, а дефицит опытов по скорости разложения растительного опада в условиях низких температур затрудняет калибровку этих моделей “по месту” [16].

Математическая модель ROMUL [18, 27, 32] может быть использована для анализа динамики ПОВ широкой географии, поскольку в этой модели основные коэффициенты (минерализации и гумификации) определены в контролируемых лабораторных условиях, а поправки на влияние температуры и влажности вычислены по независимым экспериментам. Ранее предпринята попытка математического моделирования динамики ПОВ петрозема (под лишайниками) и литозема (под зелеными мхами), расположенных около научной станции Беллинсгаузен, п-ов Файлдс, о. Кинг-Джордж, архипелаг Южные Шетландские острова, Западная Антарктида [19]. Выявлен дефицит экспериментальных данных по количеству и качеству опада, отсутствие длительных наблюдений за гидротермическим режимом почв. Недостающие входные параметры компилировали в имитационных экспериментах, предполагая постоянными запасы ПОВ при неизменных биоклиматических условиях.

В проведенных вычислительных экспериментах стационарность запасов ПОВ петрозема не была достигнута полностью: при стабильных запасах подстилки отмечена значительная аккумуляция органического вещества в минеральной части почвенного профиля – 30% за 50 лет. Вероятно, в реальной почве могут происходить эоловые

потери подстилки и опада, либо минерализации детрита и гумуса идет интенсивнее, чем заложено в модели, так как действуют какие-то неучтенные факторы. Равновесное состояние запасов ПОВ литозема удалось имитировать лучше. Рассчитанные величины эмиссии $\text{C}-\text{CO}_2$ для петрозема и литозема были в 10 раз меньше полевых измерений (по валовому дыханию) для участков с лишайниковой и моховой растительностью около станции Беллинсгаузен [15]. В указанной публикации приведены сведения только о растительности и местоположении ключевых участков (кустистые лишайники на сухих и щербистых повышениях и сплошные моховые подушки во влажных понижениях), информации о почвах нет. При моделировании лесных почв, где неопределенность оценки входных параметров меньше, оценки эмиссии $\text{C}-\text{CO}_2$ соответствовали измеряемым величинам [23, 44]. Разница между модельными и измеренными величинами эмиссии $\text{C}-\text{CO}_2$ для почв о. Кинг-Джордж могла быть обусловлена отличием моделируемых и полевых запасов ПОВ, неучтенным влиянием биоты, а также спецификой погодных условий полевых измерений и среднемесячных климатических показателей модельного климата.

Учитывая дефицит и неопределенность полевых данных, целесообразно детализировать анализ ведущих факторов почвообразования литоземов, где в профиле минимальны нарушения (не выражено действие ветровой эрозии и криотурбации). Литоземы формируются на маломощных (до 30 см) рыхлых отложениях, подстилаемых массивной плитой слабоарозированной породы [17]. В профиле литоземов нет слоя многолетнемерзлых отложений, поэтому по классификации почв, принятой в России, их не относят к мерзлотным почвам, криоземам [6]. Ведущие почвенные процессы, минерализация и гумификация, в условиях Антарктики приводят к формированию повышенного количества фульвокислот, в молекулах которых преобладает алифатическая часть [28]. Комплекс такого фульватного гумуса и частично разложенных растительных остатков определяет лабильность системы органического вещества литоземов и быстрый отклик на изменение условий среды. Оценки отклика системы органического вещества литоземов на смену растительности, усиление влияния орнитогенного фактора не производились.

В связи с вышеизложенным сформулированы задачи представляемого исследования: 1) провести анализ соответствия полевых данных по литоземам Западной Антарктики для составления рабочих сценариев модели ROMUL; 2) проверить, влияет ли детальность ввода температуры почвы, по средним суточным или средним месячным значениям, на результаты вычислений; 3) в средне-срочных вычислительных экспериментах (50 лет)

при постоянных климате и поступлении опада провести анализ изменения структуры и качества запасов органического вещества литоземов: а) при смене моховой растительности на злаковую; б) вследствие орнитогенного увеличения содержания азота в опаде; 4) сравнить запасы ПОВ литозема: по экспериментальным данным и по результатам длительных имитационных экспериментов (500 лет) в условиях постоянного климата и разных сценариев поступления опада; 5) оценить почвенную эмиссию CO₂ по экспериментальным и модельным результатам.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Общая характеристика района исследования. О. Кинг-Джордж – самый крупный остров архипелага Южные Шетландские острова. Расположен севернее изотермы среднегодовых температур –1°C в природной зоне субантарктической тундры. Образование почв идет на неширокой прибрежной полосе, свободной ото льда. В качестве почвообразующих пород выступают морской аллювий, элювий андезитов и базальтов. В районе расположения станции Беллинсгаузен в почвенном покрове наибольшее распространение имеют литозем серогуmusовый под зелеными мхами и литозем дерновый под щучкой антарктической (*Deschampsia antarctica* É. Desv.) [2, 4, 14]. В составе растительности преобладают зеленые мхи, но отмечено распространение щучки на новые территории за счет эолового переноса семян и перемещения целых растений птицами при питании и гнездовании [21]. Хотя в субантарктических тундрах физическое выветривание доминирует над биохимической трансформацией вещества, растительный покров, подстилка и ассоциированная с ними микрофауна играют значительную роль в функционировании антарктических экосистем, определяя их биологическую продуктивность, регуляцию температуры и влажности почвы [45]. Почвы в районе исследования разнообразны и представлены в основном Cryosols (автоморфные и переувлажненные равнины, где выражены признаки криогенного массообмена), Leptosols (почвы, формирующиеся в условиях низкой мощности слоя рыхлых почвообразующих пород), Arenosols (песчаные почвы со слабообразованным профилем), Histosols (накопления органического вещества мощностью до 50 см в отдельных случаях), Technosols (химически загрязненные, транспортированные или захлапанные почвоподобные тела) и почвы, формирующиеся под влиянием пингинов и перелетных птиц. В прибрежной зоне типичны также Tidalic Fluvisols (формирующиеся в зоне морских приливов). Таким образом, почвенный покров является разнообразным. При этом большинство почв имеют высокое содержание скелетной фракции (hyperskeletal). Почвы во-

доразделов иногда имеют элювиальные и иллювиальные горизонты. В зонах недавней дегляциации в настоящее время происходит колонизация морен и флювиогляциальных отложений растениями, приносимыми птицами и первичное почвообразование. Детальное описание почв дано в работе [42]. В пределах архипелага Южные Шетландские острова (если сравнивать с островами Нельсон, Десепшн, Ливингстон), на о. Кинг-Джордж почвенное разнообразие максимально, что связано в том числе с большой площадью наземных экосистем, пригодных для почвообразования.

Следует отметить, что в публикациях на английском языке применяются названия для почв Антарктики по международной классификации. Полагаем, что следует использовать и аналоги названий в соответствии с отечественной почвенной классификации. Поэтому здесь, как в предыдущей работе, оставили названия петроземы и литоземы, что соответствует классификационной группе Leptosols. Вопросу названий почв будет посвящена отдельная статья.

Модель динамики органического вещества почв ROMUL [25] была верифицирована для почв бореальной и суббореальной зон, примеры ее применения описаны ранее [18, 27]. Структура модели ROMUL (рис. 1) позволяет имитировать напочвенное и внутрипочвенное поступление и дальнейшую трансформацию опада отдельно в органическом и минеральном горизонтах почвы. Теоретической базой модели является математическая формализация концепции форм гумуса, позволяющая нормировать скорость минерализации углерода и азота по их соотношению в свежем опаде и в почве, рассчитывать скорость трансформации органического вещества по стадиям с возрастающей устойчивостью к разложению: от комплекса гумусовых веществ с частично разложившимися растительными остатками (КГВ) к комплексу гумусовых веществ с минеральной матрицей. Термин “КГВ” в модели ROMUL соответствует группам ПОВ, обозначаемым в почвоведении терминами “детрит” для минеральной части почвы и поверхностному органическому горизонту (подстилке) без слоя свежего опада.

Коэффициенты модели ROMUL k_1-k_5 зависят от химических свойств опада (содержание азота, зольность), а также температуры и влажности почвы. Коэффициенты трансформации органического вещества индикаторными группами грибов и клещей (k_1 и k_2 – минерализации углерода свежего и среднеразложившего опада соответственно, k_3 – образования гумусовых веществ) рассчитаны по опытам в контролируемых лабораторных условиях. Коэффициенты k_4 (комплекс организмов-деструкторов – бактерии и членистоногие) и k_5 (комплекс организмов-деструкторов – дождевые черви)

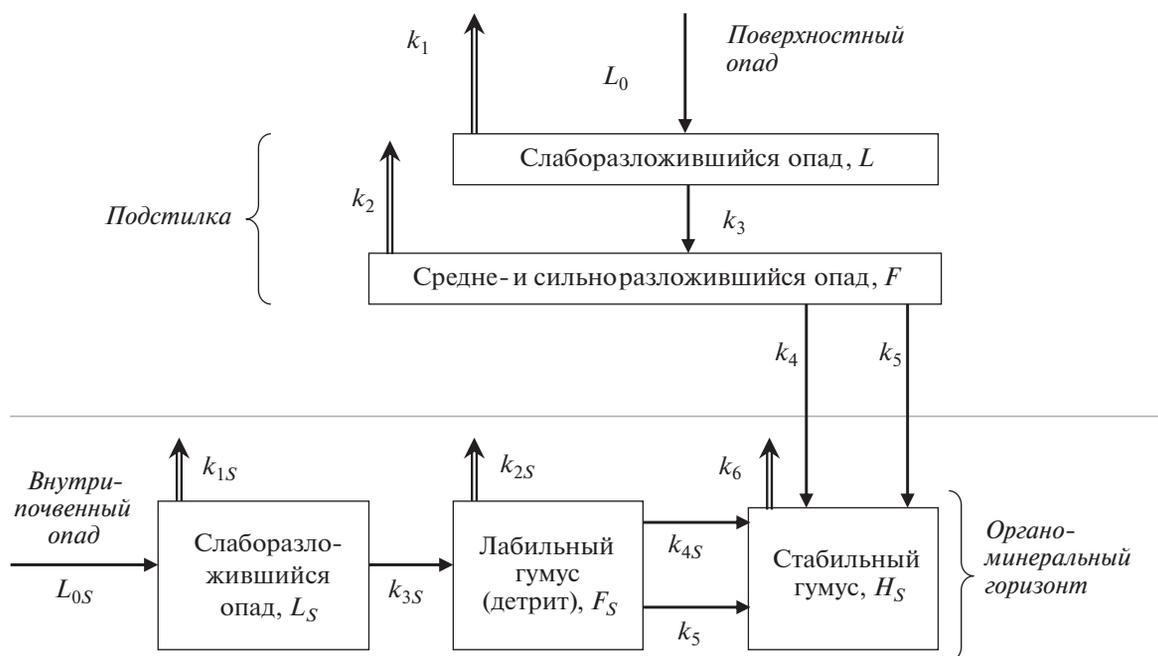


Рис. 1. Блок-схема модели ROMUL. Индексы на стрелках соответствуют потокам: трансформации (тонкие сплошные стрелки) и минерализации (широкие двойные) ПОВ. Лабильный гумус – комплекс гумусовых веществ с растительными остатками (детрит). Индекс S обозначает процессы, идущие в минеральной части почвы. Результаты вычислений по сценарию (мхи N 0.7%) не показаны, поскольку являются аналогом (мхи N 1.0%), где только больше выражена аккумуляция подстилки.

оценены по литературным данным. В имитационных экспериментах с почвами Антарктики коэффициент k_5 отключен. Размерность коэффициентов – 1/сут.

Калибруемые коэффициенты модели ROMUL. Это, во-первых, доля лабильного гумуса (детрита) в составе органического вещества минерального горизонта (соответствует соотношению пулов детрита и гумуса). Во-вторых, коэффициент скорости минерализации собственно гумусовых веществ k_6 может меняться от 6×10^{-5} до 6×10^{-4} (1/сут) для сулинистых и песчаных почв соответственно [18].

СОСТАВЛЕНИЕ СЦЕНАРИЕВ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Климатические данные для имитации гидротермических условий почвы. Режимы температуры и влажности на 50% определяют скорость и направление трансформации органического вещества [42]. Средние значения температуры воздуха на

о. Кинг-Джордж составляют -6.3°C в июле и $+1.5^{\circ}\text{C}$ в феврале, среднее годовое количество осадков 698 мм (табл. 1, данные станции Беллинсгаузен за 1968–2020 гг., подпрограмма “Изучение и исследование Антарктики” ААНИИ [22]).

В настоящей работе рассматривали гидротермические параметры дренированного литозема, без дефицита или избытка влаги. При разработке климатических сценариев применяли методический прием, разработанный ранее [19]. Для температурных сценариев использовали данные по температуре почвы на глубине 10 см под моховым покровом и щучкой антарктической за период 25.03.2008–03.03.2009 [2, 3] и данные станции Беллинсгаузен (температура воздуха) с сайта ААНИИ [22] за тот же период. Температуру подстилки принимали равной температуре воздуха, а температуру органо-минерального горизонта почвы оценивали по температуре, измеренной на глубине 10 см. Кроме того, рассчитывали разность температур почвы под растительным по-

Таблица 1. Средние значения температуры воздуха и суммы осадков по данным станции Беллинсгаузен за 1968–2020 гг. [22]

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	1.5	1.5	0.4	-1.7	-3.5	-5.4	-6.3	-6.2	-4.3	-2.6	-1.1	0.3	-2.3
Осадки, мм	55	66	74	65	60	54	57	61	59	54	47	46	698

Таблица 2. Разности средних месячных температур почвы [2, 3] и воздуха [22] по данным за 2008–2009 гг., °С

Разность температур	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Почва под мхами – воздух	1.9	1.2	0.4	1.4	0.2	–0.6	–1.0	–0.1	–1.0	0.5	0.2	1.6
Почва под щучкой – воздух	1.1	0.5	0.2	0.4	0.3	0.2	–0.3	0.2	–0.8	0.8	0.6	0.9

кровом и воздуха на метеорологической станции. Эти данные позволили, помимо “квазистационарных” сценариев, основанных на данных одного года, получить сценарии, соответствующие 50-летнему (1971–2020 гг.) ряду средних месячных данных станции Беллинггаузен по температуре воздуха, учитывающие их межгодовую изменчивость. Предполагалось, что средняя месячная температура почвы отличалась от температуры воздуха на указанные величины разностей, полученные для каждого месяца (табл. 2).

Для влажности почвы во всех случаях использовали прежние оценки [19]: 20–45 и 10–16% массы для подстилки и минерального горизонта соответственно, что было согласовано с данными полевых наблюдений на ключевом участке [2].

Погодные условия теплого времени года в Антарктике неустойчивы. Например, на полуострове Файлдс количество циклов замерзания–оттаивания почвы за теплый период года составляет ≈120 [40]. Учитывая частые переходы температуры через 0°С в условиях субантарктического лета, можно ожидать, что уменьшение временного шага моделирования позволит получать более реалистичные результаты. Климатические сценарии в модели ROMUL обычно составляются по средним месячным значениям температуры и влажности почвы, но имеется возможность использовать данные суточного разрешения, поскольку в базовом модуле программы ROMUL шаг по времени суточный. Чтобы проверить, влияет ли на результаты моделирования учет межсуточной изменчивости температур антарктического лета в районе станции Беллинггаузен, составляли сценарии с суточным шагом.

Исходные запасы органического вещества литозема под зелеными мхами (табл. 3) рассчитывали [19] по полевым наблюдениям. В подстилке литозема под зелеными мхами аккумуляровано значительное количество грубогумусного материала – 67% от общих запасов ПОВ, C/N 30, в органо-минеральном горизонте 33% от общих запасов ПОВ с относительно высоким содержанием азота, C/N 7.5.

Надо пояснить наше понимание терминов, используемых в экологическом почвоведении для обозначения структуры запасов ПОВ. Верхние биологически активные горизонты, органический (подстилка) и гумусовый, являются объектами экологической классификации почв – классификации форм гумуса. Органофиль – более

широкое понятие, может включать в себя и иллювиальные горизонты почв. В маломощных литоземах Антарктики органофиль состоит только из подстилки и гумусового горизонта, удобен как более лаконичный и в то же время соответствует толще почвы, для которой проводит расчеты модели ROMUL.

Вертикальная структура распределения и количество опада. В Антарктике встречаются чистые зеленомошные растительные ассоциации, иногда щучка антарктическая и зеленые мхи растут вместе, конкурируя за свет и элементы питания. Щучка также может разрастаться в местах, где зеленые мхи погибли [37]. Зеленые мхи дают только поверхностный опад. В травянистых ассоциациях поверхностный опад дополняется поступлением отмирающих корней в почву. Теоретически, внутрипочвенное поступление опада способствует более тесному контакту с почвенной минеральной матрицей и ускоряет формирование гумусово-аккумулятивного горизонта. В экспериментальных работах установлено, что развитие корневых систем растений в оттаивающих многолетнемерзлых породах может ускорять разложение органического вещества в 4 раза [38]. Работ по изучению структуры, количества и динамики трансформации опада для района исследований нет.

Имитировали два типа поступления опада: поверхностное (под зелеными мхами) и поверхностно-внутрипочвенное (под щучкой антарктической). Побег щучки дают напочвенный опад. Опад корней щучки распределяли между подстилкой и минеральной частью профиля. Корни, отмирающие в подстилке, по логике модели ROMUL, производят напочвенный опад. В биомассе тундровых злаков преобладают корни. Приняли, что на почву поступают отмирающие стебли и листья (20% от общего количества опада). Опад

Таблица 3. Исходные запасы органического вещества и валового азота в литоземе под зелеными мхами [19]

Показатель	Подстилка	Органо-минеральный горизонт	Итого
ПОВ, кг/м ²	3.00	1.50	4.50
N _{орг} , кг/м ²	0.05	0.10	0.15
C/N	30.0	7.5	–

Таблица 4. Содержание азота (N, %) в тканях растений для фоновых и находящихся в 50 м от гнездовья пингвинов местообитаний [33]

Растение	Фон	50 м от гнездовья
Щучка, стебли	1.40	2.61
Щучка, корни	0.90	2.28
Зеленые мхи	1.00	1.65

корней распределяли по 40% между подстилкой и гумусовым горизонтом.

Известно, что фитомасса зеленых мхов может сильно варьировать в зависимости от увлажнения и трофности почвы. На дренированных местообитаниях в Антарктике фитомасса зеленых мхов может быть большой, до 938 г/м² [35]. Работы по изучению годичных приростов тундровых зеленых мхов единичны, в литературе представлены исследования только по арктическим тундрам. Например, продукция зеленого мха *Hylocomium splendens* (Hedw.) в тундровых редколесьях Западного Таймыра составляла 110–170 г/(м² год) [12], зеленых мхов (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi* и видов семейства Polytrichaceae) в тундрах Хибин – от 30 до 117 г/(м² год) [29]. У мхов отмирающая часть фитомассы (опад) соответствует их годичному приросту и составляет около 70% по отношению к живой части [24], тогда количество опада в соответствии с приведенными данными может составлять от 21 до 170 г/(м² год).

В вычислительных экспериментах количество опада зеленых мхов оценивали методом решения обратной задачи (spin-up), используемом в имитационном моделировании для определения параметров при отсутствии измеренных данных [18, 26]. Для моделируемого литозема подобрано [19] равновесное количество опада зеленых мхов 55 г/(м² год), эту величину использовали и в текущих вычислительных экспериментах.

Количество опада щучки антарктической приняли равным массе опада зеленых мхов. Учитывая структуру опада щучки, получили, что стебли и листья, отмирая, дают 11 г/(м² год), а опад корней распределяется между подстилкой и органо-минеральным горизонтом поровну, то есть по 22 г/(м² год). В основных сценариях (по средним месячным метеорологическим данным) образование опада происходило в каждый из четырех месяцев с положительными температурами. В сценариях по средним суточным параметрам соответствующий месячный опад распределяли равными долями на каждый день месяца.

Содержание азота в опаде растений фоновых местообитаний и в 50 м от гнездовья пингвинов. Пингвины, тюлени, морские птицы играют важную роль в формировании почв прибрежных место-

обитаний Западной Антарктики [5, 43, 47]. Влияние птиц распространяется не только на территории гнездовых, но и на прилегающие ландшафты. Главное следствие действия зоогенного фактора – обогащение почвы органическим веществом морского происхождения. Влияние зоогенного фактора может быть прямое, от поступления мортмассы и фекалий, и косвенное, когда изменяется качество опада. Например, отмечено накопление азота [33] в тканях растений, в частности, в зеленых мхах и щучке антарктической, по мере приближения мест их произрастания к гнездовьям пингвинов (табл. 4). В живых и отмерших частях зеленых мхов в тундрах Евразии содержание N составляет 0.7–1.2 и 0.5–1.1% соответственно [8]. В зеленых мхах Антарктики концентрация азота варьирует от 1.00–2.22 [33] до 4.01% [2]. Зная такой широкий диапазон содержания азота в растительных тканях, при составлении рабочих сценариев не учитывали обеднение азотом опада за счет оттока из отмирающих частей растений.

Качество опада в рабочих сценариях для фоновых и находящихся в 50 м от гнездовья пингвинов местообитаний имитировали в соответствии с данными табл. 4: а) зеленые мхи, напочвенное поступление опада, N 0.7, 1.0 или 1.65% (названия сценариев: мхи N 0.7, 1.0 или 1.65); б) щучка антарктическая поступление опада на/в почву, 1.40 и 0.90 или 2.61 и 2.28% N в стеблях и корнях соответственно (названия сценариев: щучка N 1.4/0.9 и 2.61/2.28).

Продолжительность имитационных экспериментов. Процессы почвообразования в Субантарктике идут уже длительное время. Например, в районе бразильской антарктической станции Команданте Ферраз, берег Адмиралтейского залива о. Кинг-Джордж, торфяным почвам около 4–5 тыс. лет [34]. В отсутствие резких колебаний климата почвенно-растительный покров меняется относительно медленно. Для среднесрочной калибровки модели выбран период 50 лет. Такой срок позволяет установить основной тренд динамики ПОВ. Для проверки долгосрочной стабилизации запасов ПОВ литоземов продолжительность вычислительных экспериментов увеличивали до 500 лет, используя повторение базовых 50-летних климатических и почвенных сценариев.

Калибровка доли лабильного гумуса и скорости разложения гумуса. Значения калибруемых коэффициентов модели ROMUL, доли лабильного гумуса (детрита) и коэффициента скорости минерализации гумусовых веществ k_6 устанавливали в пробных вычислениях. Условие корректности подбора коэффициентов – стабилизация запасов ПОВ. При напочвенном поступлении опада, согласно модели ROMUL (рис. 1), блок лабильного гумуса (детрита) не пополняется, поскольку нет внутрпочвенного опада. Следовательно, ла-

бильный гумус будет только минерализоваться и гумифицироваться (то есть переходить в блок гумуса), постепенно исчезая. Поэтому долю лабильного гумуса в исходной почве сразу приняли равной 0. При таком допущении $k_6 = 0.00075$ (1/сут) удовлетворяет условиям стабильности запасов гумуса. В субантарктических почвах формирование гумуса задерживается на ранних лабильных стадиях, и такое искусственное объединение групп внутрипочвенного органического вещества оправдано.

Неполнота экспериментальных данных. Как отмечено в литературе нет сведений о структуре фитомассы зеленомошных и злаковых растительных ассоциаций, количестве опада. В публикациях есть отдельные данные по содержанию азота в растительном материале, но только в одной [33] сделана попытка оценки влияния гнездовий на этот показатель. Такая же ситуация сложилась относительно описаний и количественных оценок запасов подстилок мощностью <10 см. Пока еще мало данных по гидротермическому режиму литоземов. Кроме того, работа с первоисточниками затруднена из-за разных форм описания полевых исследований и их неполноты.

Для оценки адекватности проведенных вычислительных экспериментов целесообразно сопоставить их результаты с экспериментальными данными. Статистический метод Монте-Карло, интегрированный в модель ROMUL, позволяет оценить стандартное отклонение расчетных данных, вызванное задаваемым разбросом входных параметров [18]. В настоящей работе варьирование опада и исходных запасов подстилки приняли равным 50%, а для исходных запасов органического вещества минеральных горизонтов 20%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вычислительные эксперименты, проведенные по базовым сценариям поступления опада для проверки влияния детальной вводу данных по температуре почвы, показали незначительные различия результатов для средних суточных и средних месячных значений температуры. Величина запаса подстилки по итогам 50-летних вычислительных экспериментов с суточным шагом становится на 1–2% меньше, чем при месячном шаге, а запас гумуса органо-минерального горизонта – на 0.1% меньше. При этом рассчитанная эмиссия CO₂ при суточном шаге увеличивается примерно на 2%. Полагаем, что в данном случае сравнительно небольшой диапазон межсуточных колебаний температур в летний период оказался недостаточным для существенных изменений скорости трансформации опада в модели.

Анализ динамики запасов органического вещества литозема в среднесрочных вычислительных экспериментах при постоянных климате и по-

ступлении опада показал, что сценарии мхи N 0.7 (данные не показаны) и N 1.0 (рис. 2a) с учетом стандартных отклонений в целом дают динамику пулов ПОВ, близкую стационарной, сценарий мхи N 1.65 демонстрирует сокращение запасов подстилки за счет ускорения минерализации опада. Расчеты по сценарию щучка N 1.1/0.9 показали похожую динамику пулов подстилки и гумуса и формирование нового пула – детрита (рис. 2b). Расчеты по сценарию щучка N 2.61/2.28 (рис. 2d) отражают перестройку структуры органопрофиля литозема как за счет повышенной концентрации азота в опаде, так и за счет корневого опада.

На рис. 3 показаны итоги среднесрочных вычислительных экспериментов. К 50-му году отмечено увеличение запасов подстилок (LF) на 18 и 7% и гумуса на 7 и 4% по сценариям (мхи N 0.7%) и (мхи N 1.0%) соответственно. Результаты по сценарию (мхи N 1.65%) дают сокращение запасов подстилки на 20% и увеличение пула гумуса на 10%. Перераспределение запасов между подстилкой и гумусом в целом не приводит к существенному сокращению общих запасов ПОВ (рис. 3a). Сокращение запасов подстилки больше выражено для сценариев щучка 1.4/0.9 и 2.61/2.8: на 24 и 47% соответственно, при одновременном увеличении пулов детрита и гумуса. И здесь моделирование показывает только перегруппировку пулов ПОВ при их несущественном различии по сумме (рис. 3b, 3d). Общие запасы ПОВ по результатам всех вычислительных экспериментов изменяются незначительно по сравнению с исходными, от 4.5 до 4.2 кг/м². Этому способствуют принятые условия постоянства количества поступающего опада, 55 г/м². При всей неопределенности входных параметров полученные результаты не противоречат экспериментальным данным. Например, в районе расположения станции Беллинсгаузен описаны почвы – аналоги модельным результатам: под щучкой антарктической – литозем дерновый с подстилкой 1–2 см [4], под зелеными мхами – литозем серогумусовый с подстилкой мощностью около 3 см [2]. Возникают вопросы к практическим исследованиям. Различается ли качество детрита литоземов под моховым и под злаковым покровом? Каков вклад возможного физического переноса (механизма “проваливания” [7]) детрита в аккумуляцию ПОВ в сильнокаменистых почвах? Имитации физического переноса детрита в модели ROMUL нет, это может усиливать расхождение между модельными и экспериментальными запасами ПОВ. Как оценить влияние последовательности развития растительности (разрастание щучки на голом грунте или вытеснение злаками зеленых мхов) на качестве и структуре запасов ПОВ?

Среднесрочные вычислительные эксперименты показали тренды динамики органопрофиля

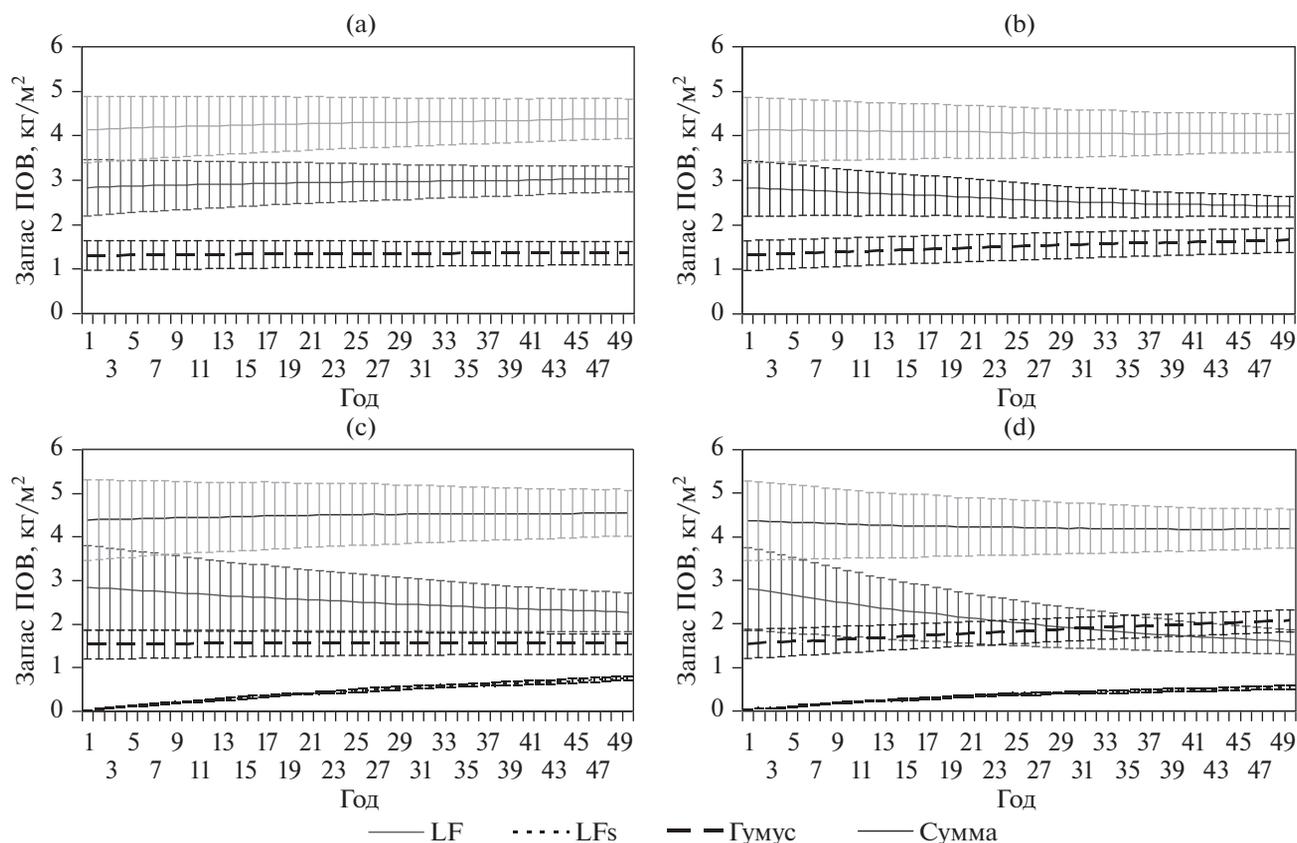


Рис. 2. Динамика запасов органического вещества литозема по данным вычислительных экспериментов при разных сценариях поступления опада: зеленых мхов с разным содержанием азота (а – N 1.0 и б – N 1.65), и щучки антарктической (с – N 1.4/0.9 и д – N 2.61/2.22). Обозначения пулов ПОВ: LF – моховая подстилка; LFs – лабильный гумус (детрит) и Гумус – устойчивое ПОВ гумуса в минеральном горизонте почвы; Сумма – сумма когортов ПОВ. Барами показаны стандартные отклонения, полученные методом Монте-Карло при варьировании начальных данных: 50% для опада и подстилки и 20% для исходных запасов органического вещества минеральных горизонтов.

литоземов при изменении структуры и орнито-генном обогащении азотом опада. В проведенных долгосрочных вычислительных экспериментах запасы подстилок стабилизируются в среднем через 200 лет, запасы органического вещества в гумусовых горизонтах – через 500 лет. Опад мхов с содержанием N 1.00% за 500 лет формирует органо-профиль, в котором запас подстилки на 6% больше, а запас гумуса на 20% меньше исходных значений. Результат вычислений по сценарию мхи N 1.65% показывает сокращение запасов подстилки на 26% и увеличение запасов гумуса на

51% по сравнению с исходными запасами. Результаты вычислений по сценарию щучка N 2.65% дают уменьшение запасов подстилки на 62% и увеличение запасов ПОВ гумусового горизонта в 123% по сравнению с исходными данными, при этом в увеличении за счет детрита 46% (рис. 4, табл. 5).

Запасы ПОВ и отношение C/N органо-минеральных горизонтов в вычислительных экспериментах соответствуют диапазону величин, приводимых в литературе для почв дренированных ландшафтов Антарктики, причем они значительно варьируют: 0.59–16.59 кг/м², C/N 9–22 [9, 10, 30] и

Таблица 5. Изменение запасов подстилки и ПОВ гумусового горизонта в вычислительных экспериментах с моделью ROMUL, % от исходных

Растительность N, %	Длительность, годы	Подстилка	Детрит	Гумус	Детрит + гумус
Зеленые мхи, N 1.0	50	+1	0	-10	-10
	500	+6	0	-20	-20
Щучка, N 2.65/2.28	50	-56	+35	+37	+72
	500	-62	+46	+77	+123

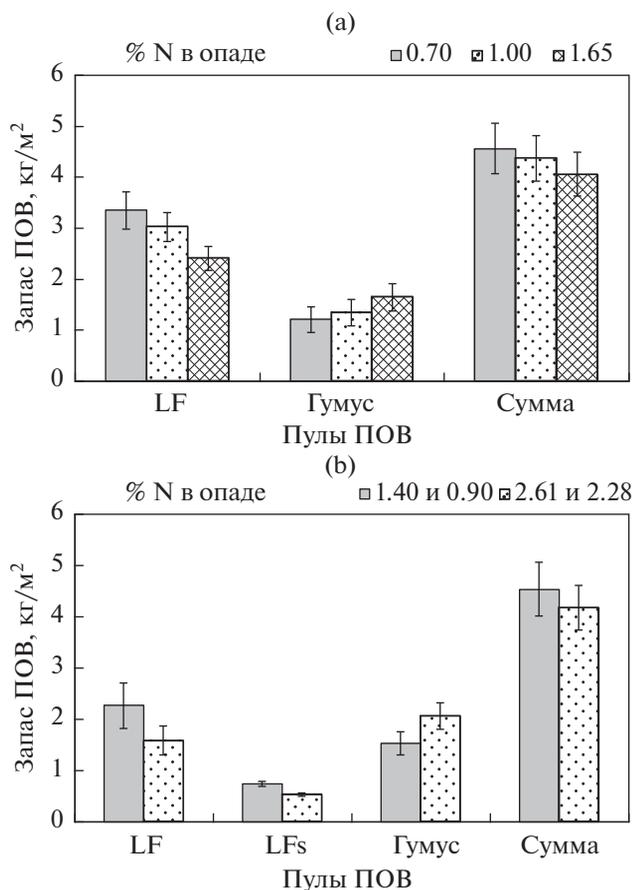


Рис. 3. Итоговые результаты вычислительного 50-летнего эксперимента. Аккумуляция POV в литоземе под моховым (а) и злаковым (б) покровом при разном содержании азота в опаде.

1.14–3.10 кг/м², C/N 14–40 [31]. Запасы и C/N подстилок в указанных публикациях не приведены, почвы названы по разным классификациям, описание растительности может отсутствовать.

Сравнительный анализ модельных оценок и полевых измерений эмиссии CO₂ литоземов с разными напочвенным покровом (зеленые мхи и щучка) и содержанием азота в опаде выполнен по среднесрочным вычислительным экспериментам. Подсчитаны средние значения интенсивности эмиссии C–CO₂ в г/(м² ч) за первые 10 лет вычислительных экспериментов (рис. 5). Наиболее существенные величины эмиссии C–CO₂ из почвы приходятся на период с преобладанием положительных среднесуточных температур, с декабря по март. Интенсивность эмиссии зависит от содержания азота в опаде, минимальна в сценариях с зелеными мхами с N 0.7%, максимальна в сценариях со щучкой с N 2.65/2.28% в опаде побегов и корней. Показатель эмиссии C–CO₂ является одним из возможных видов контроля достоверности работы модели. Диапазон выделения CO₂ из почв по всем сценариям составлял от минимального 0.0043 до максимального 0.0160 г/(м² ч). Суммарная годовая эмиссия C–CO₂ по нашим расчетам составляла от 0.0298 до 0.0441 г/м². Увеличение эмиссии в расчетах по разным сценариям связано с увеличением содержания азота в опаде и является результатом минерализации опада и POV.

Сравнительный анализ результатов моделирования эмиссии CO₂ и экспериментальных данных показал что литературные данные могут значительно превышать расчетные. Например, в работе [39] среднее количество измеренной эмиссии C–CO₂

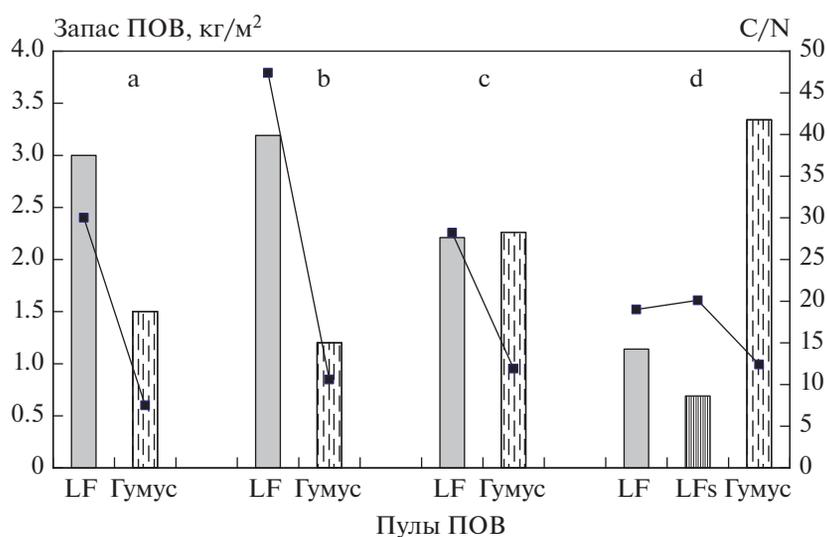


Рис. 4. Запасы органического вещества и отношения валовых C и N: исходные, литозем под моховым покровом (а); результаты вычислительных экспериментов в конце долгосрочного (500 лет) вычислительного эксперимента по сценариям: мхи N 1.0 (б); N 1.65 (с); щучка N 2.26/2.22 (д).

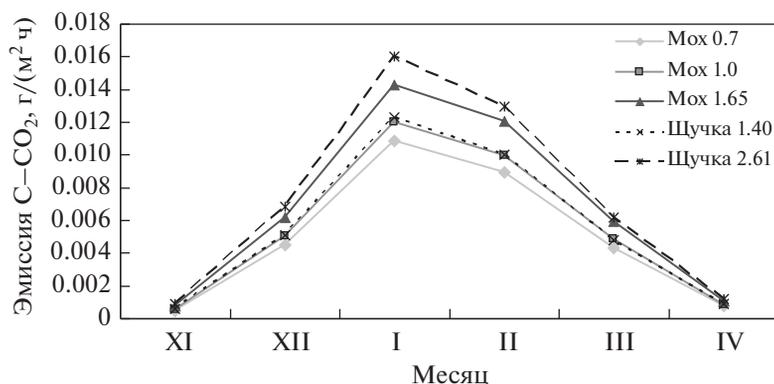


Рис. 5. Результаты моделирования эмиссии С–СО₂ литоземов под зелеными мхами и щучкой антарктической. Эмиссия С–СО₂ рассчитана помесечно, с ноября по апрель, по средним месячным данным за первые 10 лет среднесрочных вычислительных экспериментов. Цифры в легенде, следующие за названиями растений, обозначают концентрации N, % в напочвенном опаде по рабочим сценариям (для щучки – данные по побегам).

составляло 0.072 и 0.162 г/(м² ч) для почвы с зелеными мхами и щучкой антарктической соответственно. Измерения проведены неподалеку от бразильской антарктической станции Команданте Ферраз, берега Адмиралтейского залива о. Кинг-Джордж. Запас органического вещества в слое 0–20 см минеральной почвы 1.5 кг/м² (сведений о подстилке нет). Температура в период измерений была от –1 до +8°С. То есть почвенные и климатические условия похожие. Модельные оценки эмиссии СО₂ составляют 6–10% от величин, измеренных в работе [39]. При этом характеристика почвы в указанной работе дана обобщенная для всего участка, в том числе не ясно, насколько различаются свойства и запасы органического вещества под различным растительным покровом.

Средние величины валового дыхания, измеренные в феврале–марте 2008 г. в окрестностях станции Беллинсгаузен [15], составляли 0.025 и 0.134 г/(м² ч) для участков с зелеными мхами и со щучкой антарктической соответственно. В этом случае модельные оценки эмиссии СО₂ составляют 17–12% от измеренных величин. В работе [15] дается пояснение, что дыхание мхов может составлять 95% от валового дыхания почвы. Тогда на почвенную эмиссию приходится 0.0013 г/(м² ч), и это величина уже того же порядка, что и имитированная при моделировании.

Возьмем для сравнения данные о полевых измерениях эмиссии СО₂ по тундрам Северного полушария. В теплое время года средняя эмиссия СО₂ из почвы под зелеными мхами и лишайниками (стационар Лаврентия, Чукотский полуостров, данные за 2003–2004 гг.) составляла 0.037–0.075 г С–СО₂/(м² ч) [16]. Эмиссия СО₂ с поверхности ненарушенных литоземов под моховым покровом (Земля Франца-Иосифа, июль

2017 г.) составляла 0.0128 ± 0.0057 г С–СО₂/(м² ч) [20]. Эти полевые результаты одного порядка с модельными оценками.

В целом, учитывая неопределенности параметров для составления сценариев, результаты математической имитации эмиссии СО₂ литоземами Антарктиды в первом приближении можно считать удовлетворительными. Требуется уточнение полевых методов определения почвенной эмиссии СО₂ и разработки общих приемов фиксации результатов.

Неопределенности в имитационных экспериментах и экспериментальных данных. Проблема неопределенности результатов имитационного моделирования и неполноты экспериментальных данных недавно обсуждена на примере оценки динамики ПОВ лесных почв Подмосковья [23]. Для почв Субантарктики есть своя специфика неопределенности проведения вычислительных экспериментов. По сравнению с лесными экосистемами дефицит данных полевых антарктических исследований выражен больше. Это касается гидротермического режима почв, структуры и количества фитомассы и опада, в особенности опада корней и их распределения между подстилкой и гумусовым горизонтом. Пространственная неоднородность структуры почвенно-растительного покрова вносит значительный вклад в оценку как всех входных параметров для модели, так и в контрольные величины для оценки адекватности вычислительных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математические модели все чаще используются в экологических исследованиях, актуально расширение географии их применения. Поскольку в моделях обычно учитываются только ведущие почвенные процессы и факторы, важно корректно

сопоставлять результаты модельных и полевых исследований, проверять соответствие математической имитации и природной динамики, контролировать достоверность расчетов [23]. Специфика первичных почвенных данных по субантарктическим тундрам заключается в особой степени неоднородности фрагментарного почвенно-растительного покрова, наибольшим по сравнению с другими природными зонами дефицитом полевых исследований. По экспериментальным данным самым важным на сегодняшний момент является учет запасов и качества поверхностных органических горизонтов мощностью до 10 см. Такие сведения отсутствуют в большинстве изученных литературных источников. Также важно выбрать единую международную форму описания ключевых участков, в которой будет отмечен оптимальный минимум параметров, необходимых для фиксации растительности и почв. Несмотря на перечисленные неопределенности исходных данных, надо отметить общую адекватность результатов проведенных вычислительных экспериментов. Система антарктических литоземов под зелеными мхами и щучкой показала реалистичную динамику воспроизводства запасов ПОВ, а также изменения в диапазоне наблюдаемых величин одного из главных критериев качества ПОВ, С/Н и почвенной эмиссии CO₂.

Детальность учета температуры (использование среднесуточных или среднемесячных значений) слабо влияет на результаты расчетов. Показано, что разная локализация опада под зелеными мхами и щучкой антарктической формирует различные по структуре и качеству органопрфили. Обогащение азотом за счет жизнедеятельности пингвинов, повышает интенсивность трансформации опада и усиливает гумификацию, при этом результаты среднесрочной (50-летней) имитации динамики запасов органического вещества литоземов с разной орнитогенной нагрузкой существенно различаются при смене типа растительности и увеличении концентрации азота в опаде. Долгосрочные (при постоянных климате и опаде) вычислительные эксперименты показали, что стабилизация запасов подстилок и гумуса в условиях Субантарктики происходит через 200 и 500 лет соответственно. Почвенную эмиссию CO₂ в моделируемых диапазонах факторов почвообразования можно считать соответствующей результатам полевых измерений при условии, что большая часть валового дыхания обеспечена растительным покровом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 19-54-18003 Болг_а “Оценка регионального вклада почв антарктических островов в глобальный баланс углерода с учетом степени стабилизации и гумификации органи-

ческого вещества” и 19-05-5-107 “Роль микрочастиц органического углерода в деградации ледникового покрова полярных регионов Земли и в формировании почвоподобных тел”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов Е.В.* Источники и состав гумуса некоторых почв Западной Антарктики // Почвоведение. 2010. № 2. С. 538–547.
2. *Абакумов Е.В.* Почвы Западной Антарктики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2011. 112 с.
3. *Абакумов Е.В., Андреев М.П.* Температурный режим гумусовых горизонтов почв острова Кинг-Джордж, Западная Антарктика // Вестник С.-Пб. ун-та. Сер. 3. Биология. 2011. № 2. С. 129–133.
4. *Абакумов Е.В., Власов Д.Ю., Горбунов Г.А., Козерецкая И.А., Крыленков В.А., Лагун В.Е., Лукин В.В., Сафронова Е.В.* Содержание и состав органического вещества литоземов острова Кинг-Джордж, Западная Антарктика // Вестник С.-Пб. ун-та. Сер. 3. Биология. 2009. № 2. С. 123–136.
5. *Абакумов Е.В., Жиянски М., Янева Р.* Орнитогенный фактор в формировании тундровой растительности и серогумусовых почв на острове Ливингстон, Западная Антарктика // Русский орнитологический журн. 2020. Т. 29. № 1903. С. 1360–1364.
6. *Абакумов Е.В., Лупачев А.В.* Почвенное разнообразие наземных экосистем Антарктики (в районах расположения российских антарктических станций) // Украинский антарктический журн. 2011/2012. № 10–11. С. 222–228.
7. *Абакумов Е.В., Помелов В.Н., Крыленков В.А., Власов Д.Ю.* Морфологическая организация почв Западной Антарктики // Вестник С.-Пб. ун-та. Сер. 3. Биология. 2008. № 3. С. 102–116.
8. *Базилевич Н.И., Титлянова А.А.* Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 381 с.
9. *Бейер Л., Пингпек К., Болтер М., Шнайдер Д., Блюме Г.-П.* Вариабельность запасов углерода и азота в почвах Антарктического побережья (Земля Уилкса) // Почвоведение. 1998. № 5. С. 610–613.
10. *Блюме Г.-П., Бейер Л., Шнайдер Д.* Почвы южного циркумполярного региона и их классификация // Почвоведение. 1998. № 5. С. 531–539.
11. *Власов Д.Ю., Абакумов Е.В., Надпорожская М.А., Кош Н.В., Крыленков В.А., Лукин В.В., Сафронова Е.В.* Литоземы острова Кинг-Джордж, Западная Антарктика // Почвоведение. 2005. № 7. С. 773–781.
12. *Гончарова И.А.* Изменчивость годового прироста и чистой продукции зеленого мха в тундровых редколесьях западного Таймыра // Лесоведение. 2008. № 3. С. 76–78.
13. *Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.

14. Горячкин С.В., Гиличинский Д.А., Мергелов Н.С., Коношников Д.Е., Лупачев А.В., Абрамов А.А., Долгих А.В., Завовская Э.П. Почвы Антарктиды: первые итоги, проблемы и перспективы исследований // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М.А. Глазовской). М., 2012. С. 361–388.
15. Карелин Д.В. Сравнение поверхностных потоков CO₂ в аналогичных экосистемах Арктики и Антарктики // География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов: К 100-летию проф. Н.И. Базилевич: Мат-лы конф. (Пушино, 19–22 апр. 2010 г.). М.: Ин-т географии РАН, 2010. С. 77–80.
16. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
17. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
18. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. В.Н. Кудяров. М.: Наука, 2007. 380 с.
19. Надпорожская М.А., Абакумов Е.В., Хораськина Ю.С., Быховец С.С., Шанин В.Н., Комаров А.С. Оценка возможной динамики органического вещества почв Антарктиды при климатических изменениях с применением математической модели ROMUL // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 1. С. 57–65. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1\(57-65\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1(57-65))
20. Никитин Д.А., Лысак Л.В., Мергелов Н.С., Долгих А.В., Завовская 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. 444–462. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040115>
21. Парникова И.Ю., Абакумов Е.В., Дикий И.В., Пилипенко Д.В., Швидун П.П., Поронник О.А., Козерецкая И.А., Кунах В.А. Орнитогенные локалитеты *Deschampsia antarctica* в районе Аргентинских островов (Прибрежная Антарктика) // Русский орнитологический журн. 2014. Т. 23. № 1056. С. 3095–3107.
22. Подпрограмма “Изучение и исследование Антарктики”, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ), <http://www.aari.aq>. Дата обращения 28.03.2021.
23. Припутина И.В., Быховец С.С., Фролов П.В., Чертов О.Г., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Сапронов Д.В., Мьякшина Т.Н. Применение математических моделей ROMUL и Romul_Hum для оценки эмиссии CO₂ и динамики органического вещества в серой лесной почве под листовым лесом в южном Подмоскowie // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1262–1275. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20100159>
24. Пьявченко Н.И. Прирост фитомассы и скорость накопления торфа // Повышение продуктивности заболоченных лесов. Л.: ЛенНИИЛХ, 1983. С. 42–46.
25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614584 от 10.04.2018. ROMUL – модель динамики органического вещества и азота в почвах / Комаров А.С., Зубкова Е.В., Зудин С.Л., Чертов О.Г., Надпорожская М.А., Быховец С.С.
26. Чертов О.Г., Комаров А.С. Теоретические подходы к моделированию динамики содержания органического вещества почв // Почвоведение. 2013. № 8. С. 937–946. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13080017>
27. Чертов О.Г., Комаров А.С., Надпорожская М.А., Михайлов А.В., Быховец С.С., Зудин С.Л., Зубкова Е.В. ROMUL – имитационная модель динамики органического вещества лесных почв. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 96 с.
28. Чуков С.Н., Абакумов Е.В., Томашунас В.М. Характеристика гуминовых кислот почв Антарктики методом ядерного магнитного резонанса // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1330–1334. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15110040>
29. Шнак О.В., Шмакова Н.Ю. Первичная продукция мхов в Хибинах (Кольский полуостров) // Растительные ресурсы. 2010. Т. 46. № 2. С. 42–50.
30. Beyer L., Pingpank K., Bölter M., Seppelt R.D. Soil organic matter storage in cold soils of coastal Eastern Antarctica (Casey Station, Wilkes Land) // Cryosols. Berlin: Springer, 2004. P. 509–524. https://doi.org/10.1007/978-3-662-06429-0_25
31. Carvalho J.V.D.S., Mendonça E.D.S., La Scala N., Reis C., Reis E.L., Schaefer C.E.G.R. CO₂-C losses and carbon quality of selected Maritime Antarctic soils // Antarctic Sci. 2013. V. 25. № 1. P. 11–18. <https://doi.org/10.1017/S0954102012000648>
32. Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling // Ecological Modelling. 2001. V. 138. № 1–3. P. 289–308. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00409-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00409-9)
33. Fabiszewski J., Wójcniak B. Chemical composition of some dominating plants in the maritime antarctic tundra (King George Island) // Bibliotheca Lichenologica. 2000. V. 75. P. 79–91.
34. Fabiszewski J., Wójcniak B. The occurrence and development of peat mounds on King George Island (Maritime Antarctic) // Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 1997. V. 66. № 2. P. 223–229. <https://doi.org/10.5586/asbp.1997.029>
35. Friedmann I.E. Endolithic microorganisms in Antarctic cold desert // Science. 1982. V. 215. № 4536. P. 1045–1053. <https://doi.org/10.1126/science.215.4536.1045>
36. Fritz M., Deshpande B.N., Bouchard F., Högström E., Malenfant-Lepage J., Morgenstern A., Nieuwendam A. et al. Brief Communication: Future avenues for permafrost science from the perspective of early career researchers // Cryosphere. 2015. V. 9. № 4. P. 1715–1720. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1715-2015>
37. Hill P., Farrar J., Roberts P., Farrell M., Grant H., Newsham K.K., Hopkins D.W. et al. Vascular plant success in a warming Antarctic may be due to efficient nitrogen acquisition // Nature Climate Change. 2011. V. 1. P. 50–53. <https://doi.org/10.1038/nclimate1060>
38. Keuper F., Wild B., Kumm M., Beer Ch., Blume-Werry G., Fontaine S., Gavazov K. et al. Carbon loss from northern circumpolar permafrost soils amplified by rhizosphere priming // Nature Geoscience. 2020. V. 13. P. 560–565. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0607-0>
39. La Scala N., Jr., de Sá Mendonça E., de Souza J.V., Panosso A.R., Simas F.N.B., Schaefer C.E.G.R. Spatial and temporal variability in soil CO₂-C emissions and

- relation to soil temperature at King George Island, maritime Antarctica // *Polar Sci.* 2010. V. 3. № 4. P. 479–487.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2010.07.001>
40. López-Martínez J., Schmid T., Serrano E., Mink S., Nieto A., Guillaso S. Geomorphology and surface landforms distribution in selected ice-free areas in the South Shetland islands, Northern Antarctic Peninsula region // *Cuadernos de Investigación Geográfica.* 2016. V. 42. № 2. P. 435–455.
<https://doi.org/10.18172/cig.2965>
41. Lupachev A.V., Abakumov E.V., Goryachkin S.V., Veremeeva A.A. Soil cover of the Fildes Peninsula (King George Island, West Antarctica) // *Catena.* 2020. V. 193. Art. 104613. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104613>
42. Meentemeyer V. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. *Ecology.* 1978. V. 59. № 3. P. 125–132.
<https://doi.org/10.2307/1936576>
43. Michel R.F.M., Schaefer C.E.G.R., Dias L., Simas F.N.B., Benites V., Mendonça E.S. Ornithogenic Gelisols (Cryosols) from Maritime Antarctica: pedogenesis, vegetation and carbon studies // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2006. V. 70. № 4. P. 1370–1376.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0178>
44. Nadporozhskaya M.A., Chertov O.G., Bykhovets S.S., Shaw C.H., Maksimova E.Yu., Abakumov E.V. Recurring surface fires cause soil degradation of forest land: A simulation experiment with the EFIMOD model // *Land Degradation Development.* 2018. V. 29. № 7. P. 2222–2232.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3021>
45. Prather H.M., Casanova-Katny A., Clements A.F., Chmielewski M.W., Balkan M.A., Shortlidge E.E., Rosenstiel T.N., Eppley S.M. Species-specific effects of passive warming in an Antarctic moss system // *R. Soc. Open Sci.* 2019. V. 6. № 11. Art. 190744. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1098/rsos.190744>
46. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature.* 2015. V. 520. P. 171–179.
<https://doi.org/10.1038/nature14338>
47. Simas F.N.B., Schaefer C.E.G.R., Melo V.F., Albuquerque-Filho M.R., Michel R.F.M., Pereira V.V., Gomes M.R.R., da Costa L.M. Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica: phosphatization as a soil forming process // *Geoderma.* 2007. V. 138. № 3–4. P. 191–203.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.11.011>
48. Vasilevich R., Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European North-east Russia as climate change markers // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 615. P. 1229–1238.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.053>

Application of the ROMUL Mathematical Model for Estimation of CO₂ Emission and Dynamics of Organic Matter in Lithozems of Subantarctic

M. A. Nadporozhskaya^{1, *}, S. S. Bykhovets², and E. V. Abakumov¹

¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

² Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia

*e-mail: m.nadporozhskaya@spbu.ru

The features of the formation of a system of surface biologically active horizons (organoprofile) in the Lithozems of the Subantarctic were analyzed using the methods of mathematical modeling. Simulation experiments were carried out with the ROMUL mathematical model. Working scenarios were compiled taking into account the peculiarities of the influence of climate, fauna and vegetation of the coasts of King George Island, the South Shetland Islands archipelago, West Antarctica. The detail of temperature accounting (using daily or monthly average values) has little effect on the calculation results. It is shown that different localization of litter under green mosses and Antarctic hair grass (*Deschampsia antarctica*) forms organoprofiles of different structure and quality. Enrichment with nitrogen due to the vital activity of penguins increases the intensity of litter transformation and enhances humification. At the same time, the results of a medium-term (50-year) simulation of the dynamics of organic matter pools of lithozems with different ornithogenic impact differ significantly with a change in the type of vegetation and an increase in the nitrogen concentration in litter. Long-term (at constant climate and litter) computational experiments have shown that the stabilization of litter and humus stocks under Subantarctic conditions occurs in 200 and 500 years, respectively. Soil CO₂ emission in the simulated ranges of soil formation factors can be considered to be consistent with the results of field measurements, if the most of the gross CO₂ flux is provided by the respiration of the vegetation cover. At the stage of preparing scenarios for simulation experiments, a lack of information on pools of the surface organic horizon (litter) and their quality for drained Antarctic soils was revealed. It is necessary to take into account the litter as one of the important indicators of the actual response of Antarctic soils to changes in soil formation factors. We invite the international community of scientists studying the soils of Antarctica to agree on the unification of descriptions of key sites and calculations of the results of field studies.

Keywords: Lithosem, green mosses, *Deschampsia antarctica*, ornithogenic factor