

ПАЛЕОКРИОГЕНЕЗ И ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ

УДК 004.9:631.4

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(57-65)

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОЙ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА  
ПОЧВ АНТАРКТИДЫ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ROMUL

М.А. Надпорожская, Е.В. Абакумов, Ю.С. Хораскина\*, С.С. Быховец\*,  
В.Н. Шанин\*, А.С. Комаров\*

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия; m.nadporozhskaya@spbu.ru*  
\* *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия*

Описаны принципиальные подходы к моделированию динамики органического вещества двух типов антарктических почв – литозема и петрозема – в условиях постоянного климата и при его потеплении (на 1.6 °C за 40 лет). Ключевые участки расположены на острове Кинг-Джордж, архипелаг Южные Шетландские острова, Западная Антарктида. Вычислительные эксперименты проведены с помощью математической модели динамики органического вещества почв ROMUL. Показано, что повышение потоков углекислого газа незначительно как в настоящее время, так и при возможном потеплении климата. Отмечены недостаточность полевых данных и проблемы вычислительных экспериментов, связанные с отсутствием в модели блока выноса вещества из профиля почвы. Предпринята попытка сопоставления оценок потоков углекислого газа из почвы по результатам вычислительных экспериментов и замерам в природных условиях.

*Криогенные экосистемы, петрозем, литозем, Антарктида, математические модели*

ASSESSMENT OF THE POSSIBLE DYNAMICS OF ORGANIC MATTER  
IN SOIL IN ANTARCTICA UNDER CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE USING  
THE ROMUL MATHEMATICAL MODEL

M.A. Nadporozhskaya, E.V. Abakumov, Yu.S. Khoras'kina\*, S.S. Bykhovets\*, V.N. Shanin\*, A.S. Komarov\*

*St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg,  
199034, Russia; m.nadporozhskaya@spbu.ru*  
\* *Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science,  
RAS, 2, Institutskaya, Pushchino, Moscow region, 142290, Russia*

The basic approaches for modeling the dynamics of organic matter of two typical soils of Antarctica, litozem and petrozem under permanent climatic characteristics and with warming gradient of 1.6 °C over 40 years have been described. The key areas are located on King George Island, part of the South Shetland Islands, in Western Antarctica. Computational experiments have been carried out using the ROMUL mathematical model of the dynamics of soil organic matter. It has been demonstrated that the increase of the carbon dioxide flow is insignificant both at present and under conditions of further possible warming. It has been pointed out that there is shortage of field data and certain problems in computational experiments due to the lack of the block of material removal from the soil profile in the model. An attempt to compare the results of computational experiments and measurements in natural conditions for carbon dioxide flows has been done.

*Cryogenic ecosystem, petrozem, litozem, Antarctica, mathematical models*

ВВЕДЕНИЕ

Криогенные экосистемы, к которым относятся тундровые, часть таежных и альпийские сообщества, занимают 15 % площади суши [Карелин, Замолодчиков, 2008]. Антарктические территории, где возможно почвообразование, составляют око-

ло 55 тыс. км<sup>2</sup>, или 0.2 % площади криогенных систем. В Антарктиде отсутствуют крупные ареалы почв и непрерывный почвенный покров. Почвы здесь формируются на островах, в оазисах, на возвышенностях, почти всегда они находятся в окру-

жении снега и льда [Горячкин и др., 2012]. Несмотря на сравнительно небольшую долю в педосфере, площадь совокупного почвенного покрова Антарктиды в целом составляет величину, сопоставимую с территориями некоторых европейских стран. При этом максимальное разнообразие почв в Антарктиде наблюдается в субантарктических тундрах и тундропустошах. Здесь встречаются криоземы (почвы с морфологическими признаками криогенного массообмена), литоземы и петроземы (почвы с маломощным мелкоземисто-щебнистым профилем на элювиях плотных скальных пород), торфяные почвы с толщиной органогенного горизонта до 50–100 см, стратифицированные слоистые почвы долин и засоленные почвы морских побережий [Абакумов и др., 2008; Абакумов, Крыленков, 2011]. Почвы прибрежных зон Антарктиды характеризуются относительно большими запасами органического вещества, сопоставимыми с запасами в почвах аналогичных районов Арктики. При незначительной продолжительности вегетационного периода, невысокой биологической активности и замедленных темпах разложения происходят консервация растительных остатков и их аккумуляция в почвах в форме нестойких к деградации соединений – диффузного органического вещества почв [Бейер и др., 1998; Власов и др., 2005; Абакумов, 2010]. В тундровых экосистемах главным фактором, регулирующим динамику органического вещества почв на протяжении всего года, является температура. При потеплении климата увеличение скорости процессов минерализации и гумификации в антарктических почвах должно сопровождаться развитием растительности и накоплением биомассы.

Пока в глобальном масштабе антарктические почвы не признаны ни стоком, ни источником углерода. Район Антарктиды уникален в плане сочетания природных факторов, сравнительно мало исследован, поэтому актуальны работы по систематизации наблюдений и прогнозу изменений почв на основе анализа накопленных данных. Для оценки динамики органического вещества почв при современных климатических условиях и возможных изменениях климата применимы методы математического моделирования. В данной работе предпринята попытка оценки параметров относительно стабильного функционирования органического вещества почв Антарктиды и их изменений в условиях постоянного климата и при его потеплении с помощью математической модели динамики органического вещества почв ROMUL [Chertov et al., 2001].

#### **Основные теоретические подходы к математическому моделированию динамики органического вещества антарктических почв**

Накоплен значительный объем данных по исследованию почв полярных областей Земли, тре-

бующих критического анализа. Например, на начало 2014 г. поиск по ключевым словам “permafrost + carbon” на ресурсе Web of Science давал список из 1041 работы за период 1989–2013 гг. (по данным проекта CARBOPERM, <http://www.carboperm.net/index.php?id=3>). Работы, посвященные проблемам моделирования процессов полярных экосистем, составляют примерно 1/20. Это климатические и гидрологические модели от глобального до регионального масштабов. Есть модели выделения парниковых газов, в частности  $\text{CH}_4$ , при оттаивании мерзлотных слоев минеральных почв, торфов и озерных отложений, модели динамики растительности и влияния пожаров на почвенно-растительный покров. Некоторые авторы делают попытки построения имитационных моделей для анализа динамики органического вещества мерзлотных почв. По мнению Д.В. Карелина и Д.Г. Замолодчикова [2008], долгосрочные прогнозы по любым моделям, в том числе блоковым, описывающим физико-химические процессы системой дифференциальных уравнений, недостаточно достоверны. Метод климатических аналогов, применяемый при анализе достоверности изменений климата в долгосрочных прогнозах, осложняется различиями влияния почв, почвообразующих пород и рельефа в других природных зонах либо искажением палеогеографических данных вследствие трансформации материала с течением времени. Специфика тундрового почвообразования при доминирующем влиянии абиогенных факторов, длительного холодного периода и многолетнемерзлых пород делает неприменимыми модели, построенные на экспериментальных данных для других природных зон. Практические исследования, необходимые для построения математических моделей почв полярных экосистем, пока малочисленны. Дефицит данных о скорости разложения растительного опада в экосистемах с лимитирующим действием низких температур препятствует разработке моделей по реконструкции их углеродного бюджета [Почикалов, Карелин, 2014].

Возможно, частично проблему математического моделирования динамики тундровых почв можно решить, применяя модель ROMUL, основные коэффициенты которой определены в экспериментах в контролируемых по температуре и влажности лабораторных условиях [Chertov и др., 2007; Chertov et al., 2001]. Модель ROMUL в разных версиях была верифицирована и успешно использована для анализа динамики органического вещества почв России, Финляндии, Германии, Нидерландов, Чехии, Великобритании, Канады [Надпорожская и др., 2007, 2009; Chertov et al., 2002, 2009; Mikhailov et al., 2004; Nadporozhskaya et al., 2006]. Структура модели позволяет имитировать разную локализацию опада в профиле почв

(надземный и/или подземный), основные коэффициенты модели параметризованы по независимым экспериментам и не связаны с вариацией погодных условий или спецификой биоценоза. Это делает возможным применение модели для анализа динамики органического вещества почв различных природных зон.

#### **Применение модели ROMUL для почв субарктической тундры**

При проведении имитационного моделирования динамики органического вещества почв Антарктиды важно учесть краткость периода с полужителными температурами, специфичность доминирующего растительного покрова (мхи, лишайники), поверхностное поступление опада. Авторы ограничили задачи работы анализом динамики органического вещества на локальном уровне для двух почвенных разностей автономных элементов ландшафта: литозема и петрозема. Предполагается, что возраст данных почв достаточно велик. Такое допущение можно сделать, поскольку климат Антарктиды практически не менялся в течение последнего тысячелетия [Веркулич, 2009], а в почвах аккумулярованы значительные для субантарктической тундры запасы органического вещества. Почвенные профили не имеют следов внутренних нарушений, процессы криотурбации на изучаемой территории не развиты вследствие маломощности рыхлых отложений, подстилаемых скальным основанием. Эти почвы можно считать субклимаксовыми, находящимися в равновесии с факторами среды. Несоответствие моделируемой динамики запасов органического вещества почв стационарному состоянию может свидетельствовать либо об ошибке компиляции входных данных, либо о влиянии не учтенных в модели факторов.

#### **Особенности расчета баланса органического вещества для антарктических почв**

В качестве расходной статьи баланса органического вещества в модели ROMUL учитывается только эмиссия диоксида углерода. В исследуемом случае в щебнистых маломощных почвах (литоземе и петроземе) отсутствуют условия для метанообразования. Кроме того, почвы арктических тундр не являются существенным источником метана в атмосферу (как показано в [Карелин, Замолотчиков, 2008]). Предположения о незначительных выделениях метана подтверждаются также исследованиями в Антарктиде на о. Кинг-Джордж [Renbin Zhu et al., 2005]. Газообразные потери азота в ненарушенных почвах при поступлении растительного опада считаются несущественными, что подтверждается данными исследований по арктическим тундровым почвам [Лопес де Гереню и др., 2007]. В то же время поступление

на почву высокоазотистых веществ из гуано пингвинов может повышать выделение  $N_2O$  в 3–6 раз [Renbin Zhu et al., 2005]. Но для условий возвышенного останцового плато влияние орнитогенного фактора считается незначительным. Не учитывается поступление минеральных соединений азота с атмосферными выпадениями.

#### **Объекты и сценарии компьютерных экспериментов**

Объекты для численных экспериментов – почвы о. Кинг-Джордж, архипелаг Южные Шетландские острова, Западная Антарктида. Протяженность острова с северо-запада на юго-восток почти 16 км, а с северо-востока на юго-запад около 50 км. Большая часть острова покрыта ледником. Условия для почвообразования есть на побережье. В качестве почвообразующих пород выступают морской аллювий, элювий андезитов и базальтов, моренные субстраты, переотложенные перигляциальные осадки [Горячкин, 2010].

**Климат.** Остров Кинг-Джордж относится к влажному прибрежному экоклиматическому району [Антарктика..., 2005; Bockheim, Hall, 2002]. Средневзвешенное значение температуры воздуха на о. Кинг-Джордж составляет  $-6.4$  °C в июле и  $+2.3$  °C в феврале, среднегодовое количество осадков 700–747 мм. Большая часть жидких осадков выпадает с ноября по март.

**Проблема изменения климата в Антарктиде.** По особенностям рельефа, морских, ледниковых, водно-ледниковых отложений, древним отложениям гнезд пингвинов на о. Кинг-Джордж С.В. Веркулич [2009] определил, что в краевой зоне дегляциация Антарктиды была выражена в раннем голоцене (8.5 тыс. лет назад) и продолжалась в связи с трансгрессией океана позднее. В течение последнего тысячелетия до недавнего времени ледниковая обстановка и ландшафты в Антарктиде были относительно стабильны. Современный феномен регионального потепления в пределах Южного полушария наиболее отчетливо проявляется в районе ближайшего к о. Кинг-Джордж Антарктического полуострова. Рост среднегодовых значений приземной температуры воздуха здесь превысил средние значения глобального тренда в 3–4 раза [Лагун и др., 2006; Клепиков, 2007]. Значительные повышения температуры воздуха отмечены на станциях Антарктического полуострова Беллинсгаузен и Академик Вернадский [Мартазинова и др., 2010]. За 40-летний период зафиксировано увеличение среднегодовой температуры приземного слоя воздуха с  $-2.5$  до  $-1.8$  °C для станции Беллинсгаузен и с  $-4.0$  до  $-2.3$  °C для станции Академик Вернадский. Модельные расчеты трендов динамики приповерхностной температуры составляют для станции Беллинсгаузен  $0.06$  °C/10 лет вследствие

только естественной составляющей, 0,34 °С/10 лет за счет только антропогенной составляющей и 0,43 °С/10 лет в смешанном природно-антропогенном сценарии изменений [Мохов, Карпенко, 2007].

**Величины поступления растительных остатков на почвы.** Поскольку нет полевых данных по опад для изученных почв, эти входные параметры были оценены нами по литературным данным. В напочвенном растительном покрове о. Кинг-Джордж доминируют лишайники и мхи. В антарктических ландшафтах общая фитомасса мхов достигает 1100 г/м<sup>2</sup> на торфах, 938 г/м<sup>2</sup> на дренированных местообитаниях, фитомасса эпилитных лишайников варьирует от 50 до 950 г/м<sup>2</sup>, у эндолитных лишайников может составлять 177 г/м<sup>2</sup> [Friedmann, 1982]. Продуктивность мхов и лишайников в Антарктиде может быть относительно высокой – до 100 и 5 г/м<sup>2</sup> соответственно [Longton, 1988].

Величины опада мхов и лишайников рассчитывались методом решения обратной задачи (spin-up), используемом в имитационном моделировании для определения неизвестных параметров при отсутствии измеренных данных [Чертов, Комаров, 2013; Liski et al., 2005]: модельные вычисления по исходным значениям проводились до достижения стабильных результатов, которые потом и использовались в качестве начальных. Такой подход неприменим при нерегулярных или стихийных на-

рушениях. С некоторой степенью условности метод spin-up можно применить для экосистем Антарктиды, где нарушающие факторы минимальны.

**Почвы.** Своеобразие почв Западной Антарктиды заключается в небольшой мощности профиля. Почвообразование лимитируется климатическим фактором и строго локализовано на наиболее прогреваемых элементах рельефа. Органическое вещество почв Антарктиды слабо гумифицировано, в нем преобладают фульвокислоты и детритные формы неразложившегося растительного опада [Власов и др., 2005].

**Объекты моделирования.** В численных экспериментах использовали данные по почвам о. Кинг-Джордж: литозем под зеленомошной растительностью (О 0–10 см – АУ 10–15 см – С↓ 15 см); петрозем под лишайниковой растительностью (О 0–5 см – Аао 5–7 см – С↓ 7 см).

Первичные данные по содержанию азота и золы в растительных остатках, органического вещества в почвах, по режимам температуры опубликованы со ссылками на методы их определения [Abakumov et al., 2015].

Начальные данные по пулам органического вещества и азота в почве, физические свойства почв представлены в табл. 1.

Данные по влажности почв, измеренные на о. Кинг-Джордж, сопоставимы с данными Д.В. Карелина и Д.Г. Замолодчикова [2008] для тундровых почв Северного полушария, где влажность

Таблица 1. **Характеристики литозема и петрозема, использованные при проведении вычислительных экспериментов**

| Почва                     | Запасы, кг/м <sup>2</sup> |       | C <sub>орг</sub> , % | Плотность сложения, г/см <sup>3</sup> | Полная влагоемкость | Наименьшая полевая влагоемкость | Измеренная влажность, мас.% |      |      |
|---------------------------|---------------------------|-------|----------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------|------|------|
|                           | ОВ                        | ОА    |                      |                                       |                     |                                 | мас.%                       | дек. | янв. |
| Литозем                   |                           |       |                      |                                       |                     |                                 |                             |      |      |
| Органогенный горизонт     | 3.0                       | 0.05  | –                    | 0.50                                  | –                   | –                               | 20                          | 45   | 37   |
| Минеральная часть профиля | 1.5                       | 0.10  | 0.15                 | 0.98                                  | 20                  | 15                              | 10                          | 16   | 12   |
| Петрозем                  |                           |       |                      |                                       |                     |                                 |                             |      |      |
| Органогенный горизонт     | 1.0                       | 0.03  | –                    | 0.30                                  | –                   | –                               | 23                          | 56   | 45   |
| Минеральная часть профиля | 0.07                      | 0.004 | 0.36                 | 1.32                                  | 24                  | 15                              | 9                           | 12   | 12   |

Примечание. ОВ – органическое вещество; ОА – органический азот. Прочерк – не определена.

Таблица 2. **Среднемесячная температура почвы (°С) на глубине 10 см, данные метеостанции Беллинсгаузен по температуре воздуха и оголенной поверхности почвы (с марта по февраль 2009 г.)**

| Параметр               | Месяц |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     | Среднегодовая |
|------------------------|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|---------------|
|                        | I     | II  | III | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI   | XII |               |
| Почва на глубине 10 см | 3.0   | 2.0 | 0.3 | -1.3 | -1.6 | -3.1 | -4.0 | -4.2 | -1.3 | -0.6 | 0.3  | 2.0 | -0.7          |
| Воздух                 | 2.2   | 3.1 | 0.8 | -2.5 | -1.8 | -4.0 | -4.2 | -8.0 | -6.0 | -5.0 | -2.0 | 1.0 | -2.2          |
| Поверхность почвы      | 2.5   | 2.0 | 0.0 | -1.5 | -3.0 | -4.0 | -6.3 | -7.0 | -2.2 | -1.5 | -0.2 | 2.0 | -1.6          |

Таблица 3. Водно-тепловой режим литозема и петрозема, использованный при проведении вычислительных экспериментов

| Почва                     | Январь |    | Февраль |    | Март |    | Апрель |   | Май  |   | Июнь |   | Июль |   | Август |   | Сентябрь |   | Октябрь |   | Ноябрь |   | Декабрь |    | $T_{cp}$ |
|---------------------------|--------|----|---------|----|------|----|--------|---|------|---|------|---|------|---|--------|---|----------|---|---------|---|--------|---|---------|----|----------|
|                           | T      | W  | T       | W  | T    | W  | T      | W | T    | W | T    | W | T    | W | T      | W | T        | W | T       | W | T      | W | T       | W  |          |
| Литозем                   |        |    |         |    |      |    |        |   |      |   |      |   |      |   |        |   |          |   |         |   |        |   |         |    |          |
| Органогенный горизонт     | 2.2    | 45 | 3.1     | 37 | 0.8  | 20 | -2.5   | 5 | -1.8 | 5 | -4.0 | 5 | -4.2 | 5 | -8.0   | 5 | -6.0     | 5 | -5.0    | 5 | -2.0   | 5 | 1.0     | 20 | -2.2     |
| Минеральная часть профиля | 3.0    | 16 | 2.0     | 12 | 0.3  | 10 | -1.3   | 5 | -1.6 | 1 | -3.1 | 1 | -4.0 | 1 | -4.2   | 1 | -1.3     | 1 | -0.6    | 2 | 0.3    | 2 | 2.0     | 10 | -0.7     |
| Петрозем                  |        |    |         |    |      |    |        |   |      |   |      |   |      |   |        |   |          |   |         |   |        |   |         |    |          |
| Органогенный горизонт     | 2.2    | 56 | 3.1     | 45 | 0.8  | 23 | -2.5   | 5 | -1.8 | 5 | -4.0 | 5 | -4.2 | 5 | -8.0   | 5 | -6.0     | 5 | -5.0    | 5 | -2.0   | 5 | 1.0     | 23 | -2.2     |
| Минеральная часть профиля | 2.2    | 12 | 3.1     | 12 | 0.8  | 9  | -2.5   | 5 | -1.8 | 1 | -4.0 | 1 | -4.2 | 1 | -8.0   | 1 | -6.0     | 1 | -5.0    | 2 | -2.0   | 2 | 1.0     | 9  | -2.2     |

Примечание.  $T$  – температура почвы, °C;  $T_{cp}$  – среднегодовая температура, °C;  $W$  – влажность, мас. %.

органогенных горизонтов в криогенных экосистемах держится на уровне 40–80 % в летний период. Для изученных антарктических почв моховые и лишайниковые подстилки находились при влажности несколько меньшей, чем средние диапазоны влажности северных тундр. Полевая влажность минеральных горизонтов составляла в среднем около 50 % их полной влагоемкости. Эта величина ниже благоприятной для трансформации органического вещества (60 % полной влагоемкости), т. е. выражен небольшой дефицит влаги.

Результаты полевых измерений температуры почвы на глубине 10 см, выполненные Е.В. Абакумовым, данные метеорологической станции Беллинсгаузен по температуре воздуха и оголенной поверхности почвы приведены в табл. 2.

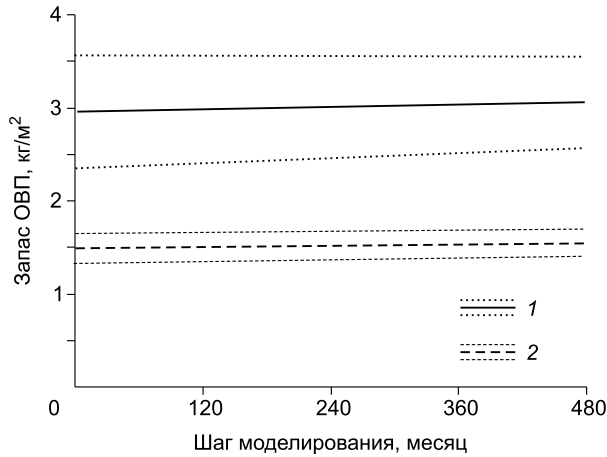
Составление сценариев постоянного климата. Полученные в практическом исследовании значения температуры для литозема взяли за исходные. Температуру моховой подстилки литозема считали равной температуре воздуха. Для петрозема температуру маломощной лишайниковой подстилки и органоминерального горизонта полагали равной температуре воздуха. Такой прием позволил имитировать относительно пониженные температуры петрозема. Продолжительность безморозного периода на все время моделирования принята равной 120 дням в год. Влажность почвы согласована с измерениями авторов по каждому участку. В холодное время года влага не активна, поэтому значения влажности холодных месяцев в сценарии уменьшены до минимума (табл. 3).

Составление сценариев изменения климата. Для построения вероятностных прогнозов изменения современных почв Антарктиды под влиянием повышения температуры воздуха был выбран период в 40 лет. Суммарное повышение среднегодовой температуры принято равным 1.6 °C, по 0.4 °C за десятилетие. Детальный многолетний климатический сценарий подготовлен с помощью генератора почвенной погоды SCLISS [Быховец, Комаров, 2002].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование динамики органического вещества литозема при постоянном климате. Равновесному с факторами окружающей среды состоянию литозема в условиях постоянного климата соответствовало поступление опада мхов в количестве 55 г/м<sup>2</sup>. При этом концентрация азота в опаде мха составляла 0.7 %. Эта величина согласуется с литературными данными: в живых мхах евразийских тундр содержится около 1 % азота, а в отмерших мхах – около 0.5 % [Базилевич, Титлянова, 2008]. Для оценки изменчивости расчетных значений модели вследствие природной неоднородности почв авторы предположили 30%-е варьирование начальных данных и оценили стандартное отклонение средних величин выходных переменных по методу Монте-Карло. Результаты приведены на рис. 1.

Таким образом, варьирование запасов органического вещества литозема составило (3.0 ± 0.6) кг/м<sup>2</sup> в органогенном горизонте и (1.5 ± 0.1) кг/м<sup>2</sup> в минеральном горизонте. То есть заданные входные параметры удовлетворили условию равновесного по запасам органического вещества состояния литозема при фактическом режиме температуры и влажности.



**Рис. 1. Динамика органического вещества литозема при неизменном климате.**

Средние значения запасов органического вещества в моховой подстилке (1) и минеральном горизонте почвы (2) и их стандартные отклонения, полученные методом Монте-Карло при варьировании начальных данных в 50 % для опада и подстилки и 20 % для органического вещества минеральных горизонтов. ОВП – органическое вещество почвы.

*Моделирование динамики органического вещества петрозема при постоянном климате.* По нашим и литературным данным [Базилевич, Титлянова, 2008; Abakutov et al., 2015], концентрация азота в живых лишайниках может варьировать в широком диапазоне – от 0.5 до 2.0 %, в опаде лишайников может быть ниже. Расчетному равновесию запасов органического вещества в петроземе соответствует величина опада лишайников 12 г/м<sup>2</sup> при 0.35 % азота. Результаты вычислительных экспериментов по динамике органического вещества петрозема представлены на рис. 2.

Следует отметить, что вычислительные эксперименты с использованием минимальных значений содержания азота в опаде дают близкую к стационарной динамику запасов органического вещества в органогенной части профиля почвы. Запасы же органического вещества в минеральном

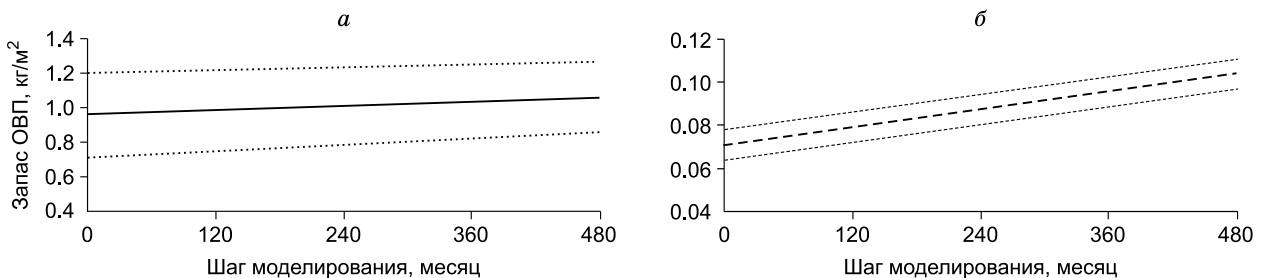
горизонте увеличиваются почти на 30 % за 40 лет. При переходе к имитации более длительных временных периодов (тысячелетия) при таких условиях образовывался бы значительный запас гумуса антарктических петроземов, что не соответствует полевым наблюдениям. В модели не предусмотрен учет выноса опада за пределы участка. Причина завышения расчетного пула органического вещества в минеральной части профиля почвы может быть в том, что в реальных условиях часть опада лишайников выносятся ветрами. На самом деле, лишайниковые сообщества за счет более рыхлой структуры менее устойчивы к деструктивному действию сильных антарктических ветров, чем моховые сообщества.

*Вычислительные эксперименты по имитации динамики органического вещества литозема и петрозема при потеплении климата.* Повышение температуры на 1.6 °C за 40 лет почти не сказывается на имитируемой динамике запасов органического вещества литозема и петрозема (рис. 3, 4).

*Вычислительные эксперименты по оценке эмиссии CO<sub>2</sub> из литозема и петрозема при стационарном климате и при потеплении.* Суммарное годовое выделение CO<sub>2</sub> из литозема и петрозема в условиях постоянного климата и при имитации возрастания среднегодовой температуры на 1.6 °C за 40 лет при неизменных влажности и поступлении опада мхов и лишайников различается незначительно (рис. 5, 6).

Для сопоставления с приведенными в литературе сведениями по потокам CO<sub>2</sub> газа из почвы проведен перерасчет этих величин с учетом продолжительности теплого периода (120 дней): 0.23 и 0.07 г/(м<sup>2</sup>·сут) или C–CO<sub>2</sub> 0.06 и 0.02 г/(м<sup>2</sup>·сут) для литозема и петрозема соответственно.

Несмотря на условность моделирования взятых за эталоны антарктических литозема и петрозема, попробуем сравнить расчетные значения C–CO<sub>2</sub> с опубликованными в литературе для других районов. Величины выделения C–CO<sub>2</sub>, по данным В.Н. Кудеярова и И.Н. Кургановой [Kudeyarov, Kurganova, 1998], в течение вегетаци-



**Рис. 2. Динамика органического вещества петрозема при неизменном климате.**

Средние значения запасов органического вещества в лишайниковой подстилке (а) и минеральном горизонте почвы (б) и их стандартные отклонения, полученные методом Монте-Карло при варьировании начальных данных в 50 % для опада и подстилки и 20 % для органического вещества минерального горизонта.

онного периода в среднем составляют для лесных почв северной тайги 0.51–2.10 г/(м<sup>2</sup>·сут), южной тайги – 0.60–3.30 г/(м<sup>2</sup>·сут). Сопоставимые данные приводятся по дыханию почв северных тундр. Максимальное выделение С–СО<sub>2</sub> из почвы северных тундровых экосистем в разгар вегетации, согласно определениям Д.В. Карелина и Д.Г. Замолдчикова [2008], может составлять от 1.2 до 3.8 г/(м<sup>2</sup>·сут). Результаты измерений потоков С–СО<sub>2</sub> на о. Кинг-Джордж [Карелин, 2010] показали, что валовое дыхание почв может изменяться в широких пределах (С–СО<sub>2</sub> г/(м<sup>2</sup>·сут)): от 0.01–0.03 на голом грунте, 0.23 на почве под лишайниками, 0.60 на почве под моховым покровом и до 3.21 под щучкой дернистой. (Пересчет данных Д.В. Карелина по С–СО<sub>2</sub> из г/(м<sup>2</sup>·ч) в г/(м<sup>2</sup>·сут) сделан авторами настоящей статьи.) Температура почв исследуемого района в течение суток может значительно варьировать в зависимости от облачности и силы ветра, поэтому реальные среднесуточные значения могут быть и ниже. Учитывая также возможное сильное пространственное варьирование запасов органического вещества в антарктических почвах, примем эти значения за ориентировочные. Тогда расчетные данные 0.06 и 0.02

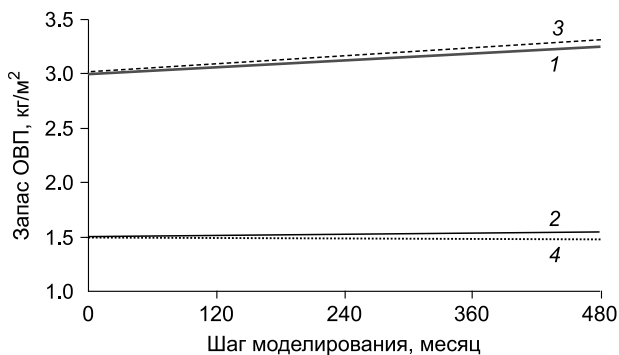


Рис. 3. Динамика органического вещества литозема при потеплении.

1, 2 – стационарный климат; 3, 4 – потепление; 1, 3 – подстилка; 2, 4 – минеральный горизонт почвы.

С–СО<sub>2</sub> г/(м<sup>2</sup>·сут) для литозема и петрозема получаются ниже измеренных (и пересчитанных нами на среднесуточные) на порядок. Корректен ли проведенный нами пересчет часовой интенсивности выделения С–СО<sub>2</sub> на суточную? Если наш пересчет корректен, то получается, что дыхание

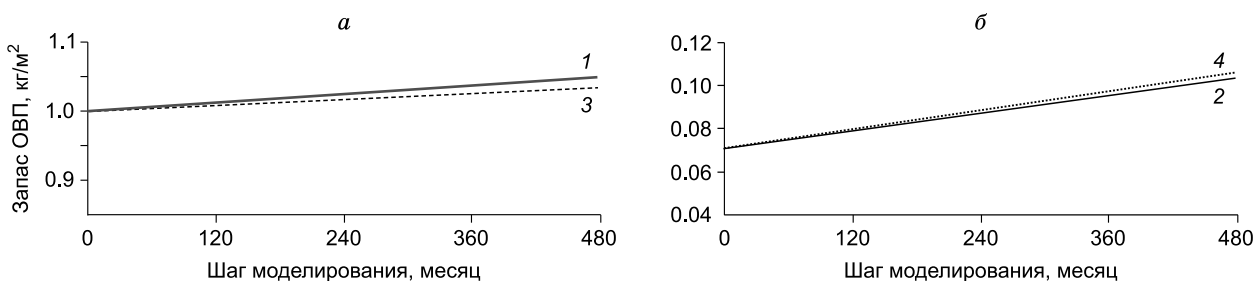


Рис. 4. Динамика органического вещества петрозема при потеплении.

а – подстилка; б – минеральный горизонт почвы; 1, 2 – стационарный климат; 3, 4 – потепление.

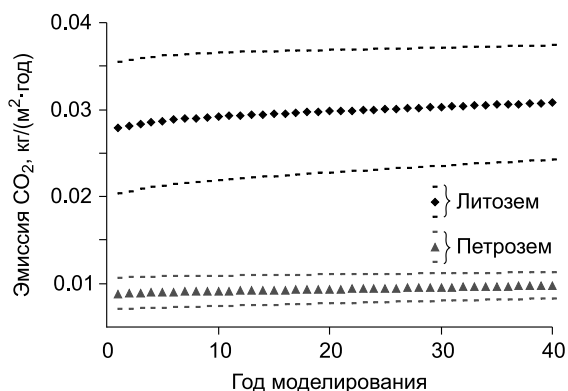


Рис. 5. Динамика выделения СО<sub>2</sub> из литозема и петрозема при неизменном климате.

Средние значения эмиссии СО<sub>2</sub> и их стандартные отклонения, полученные методом Монте-Карло при варьировании начальных данных в 50 % для опада и подстилки и 20 % для органического вещества минерального горизонта.

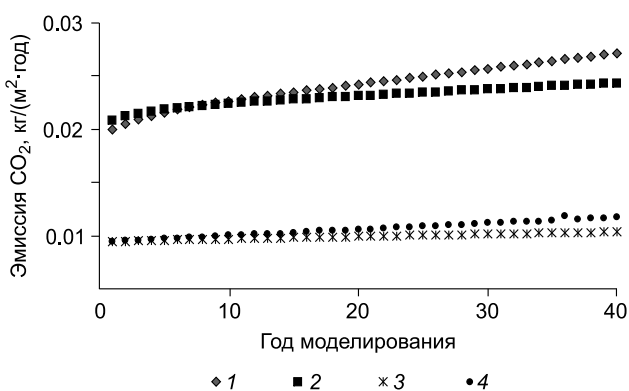


Рис. 6. Динамика суммарного выделения СО<sub>2</sub> из литозема (1, 2) и петрозема (3, 4) при неизменном климате (1, 3) и при потеплении (2, 4).

антарктических тундровых почв сопоставимо с дыханием таежных и арктических тундровых почв? Представляется, что эти вопросы требуют уточнения как в практических исследованиях, так и в области вычислительных модельных экспериментов.

В заключение следует отметить, что выявлена значительная нехватка ряда необходимых экспериментальных параметров, определяющих процессы трансформации опада и гумуса почв Антарктиды: количество и качество опада, длительные экспериментальные данные по гидротермическому режиму почв.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты вычислительных экспериментов с моделью ROMUL показали, что условиям стационарного равновесия с факторами среды функционирования почв соответствует поступление опада 55 и 12 г/(м<sup>2</sup>·год) и концентрации азота в опаде мха и лишайников 0.70 и 0.35 % для изученных литозема и петрозема соответственно. При этом стационарность запасов литозема воспроизводится адекватно, а для петрозема только для органических горизонтов. Сделано предположение о потере материала опада лишайников в реальных почвах за счет золотого массопереноса, чего пока не учитывает модель ROMUL. Возможен золотый снос опада лишайников в реальных условиях, что пока не учитывается в модели ROMUL.

2. Интенсивность выделения углекислого газа антарктическим литоземом незначительна, по величине сопоставима с минимальными уровнями дыхания таежных почв и с минимальным диапазоном уровней дыхания почв, измеренным на о. Кинг-Джордж. Вычислительные эксперименты показали, что дыхание петрозема по интенсивности в 3 раза ниже, чем литозема (это соответствует соотношению измеренных величин). Но абсолютные значения моделируемых потоков углекислого газа из изученных почв на порядок меньше представленных в литературе по фактическим измерениям.

3. Вклад изученных антарктических почв в глобальный баланс углекислого газа незначителен как по интенсивности, так и в связи с краткостью теплого периода и небольшой площадью этих почв. При возможном потеплении климата (на 1.6 °С за 40 лет) выделение углекислого газа из литозема и петрозема, по оценкам авторов, увеличится несущественно.

*Работа выполнена при частичном финансировании ФЦП Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и технологий на 2007–2013 гг., государственный контракт 11.519.11.2003 от 17 августа 2011 г. и РФФИ (проекты № 12-04-90401-а, 12-04-01269-а, 12-04-*

*00680-а, 15-04-06118-а, 16-34-60010) и работы в рамках экспедиционных исследований 61-й Российской антарктической экспедиции, поддержанных СПбГУ и ААНИИ Росгидромета РФ.*

## Литература

- Абакумов Е.В.** Источники и состав гумуса некоторых почв Западной Антарктики // Почвоведение, 2010, № 2, с. 538–547.
- Абакумов Е.В., Крыленков В.А.** Почвы Антарктиды // Природа, 2011, № 3, с. 58–62.
- Абакумов Е.В., Помелов В.Н., Крыленков В.А., Власов Д.Ю.** Морфологическая организация почв Западной Арктики // Вестн. С.-Петербур. ун-та. Сер. 3, 2008, вып. 3, с. 102–116.
- Антарктика.** Атлас. СПб., Гл. упр-ние навигации и океанографии, 2005, 280 с.
- Базилевич Н.И.** Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / Н.И. Базилевич, А.А. Титлянова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008, 381 с.
- Бейер Л., Пингпек К., Болтер М. и др.** Вариабельность запасов углерода и азота в почвах Антарктического побережья (Земля Уилкса) // Почвоведение, 1998, № 5, с. 610–613.
- Быхолец С.С., Комаров А.С.** Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение, 2002, № 4, с. 443–452.
- Веркулич С.В.** Условия и ход дегляциации в краевой зоне Антарктиды // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 73–81.
- Власов Д.Ю., Абакумов Е.В., Надпорожская М.А. и др.** Литоземы острова Кинг-Джордж, Западная Антарктика // Почвоведение, 2005, № 7, с. 773–781.
- Горячкин С.В.** Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция) / С.В. Горячкин. М., ГЕОС, 2010, 414 с.
- Горячкин С.В., Гиличинский Д.А., Мергелов Н.С. и др.** Почвы Антарктиды: первые итоги, и проблемы и перспективы исследований // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М.А. Глаззовской) / Под ред. Н.С. Касимова, М.И. Герасимовой. М., МГУ, 2012, с. 365–392.
- Карелин Д.В.** Углеродный обмен в криогенных экосистемах / Д.В. Карелин, Д.Г. Замолотчиков. М., Наука, 2008, 344 с.
- Карелин Д.В.** Сравнение поверхностных потоков CO<sub>2</sub> в аналогичных экосистемах Арктики и Антарктики // География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов: К 100-летию проф. Н.И. Базилевич: Материалы конф. (Пушино, 19–22 апр. 2010 г.). М., Ин-т географии РАН, 2010, с. 77–80.
- Клепиков А.В.** Предисловие // Проблемы Арктики и Антарктики, 2007, № 76, с. 5–7.
- Лагун В.Е., Иванов Е.И., Яговкина С.Я.** К вопросу о потеплении в районе Антарктического полуострова // Problemi klimatologii polarnej, 2006, № 16, с. 23–45 (на рус. яз.).
- Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Велл Р. и др.** Влияние контрастной смены гидротермических условий на выделение N<sub>2</sub>O из лесных и тундровых почв // Почвоведение, 2007, № 7, с. 885–889.
- Мартазинова В.Ф., Тимофеев В.Е., Иванова Е.К.** Современный региональный климат Антарктического полуострова и станции Академик Вернадский // Украинский Антарктический журн., 2010, № 96, с. 231–248 (на рус. яз.).



- Мохов И.И., Карпенко А.А.** Моделирование потепления в районе Антарктического полуострова // Проблемы Арктики и Антарктики, 2007, № 76, с. 7–13.
- Надпорожская М.А., Абакумов Е.В., Чертов О.Г.** Моделирование накопления органического вещества в почве при зарастании отвалов карьеров Ленинградской области // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. В.Н. Кудеяров. М., Наука, 2007, с. 254–261.
- Надпорожская М.А., Цудлин П., Новак Ф. и др.** Применение математической модели ROMUL для анализа устойчивости почв ельников Крконоши в Чехии // Почвоведение, 2009, № 6, с. 708–718.
- Почикалов А.В., Карелин Д.В.** Окологодичные наблюдения за разложением опада тундровых растений через потерю массы и эмиссию CO<sub>2</sub>; роль биотических и абиотических факторов, сезонов года, биотопа и пространственно-временного масштаба // Журн. общ. биологии, 2014, т. 75, № 3, с. 163–181.
- Чертов О.Г.** ROMUL – имитационная модель динамики органического вещества лесных почв: Учеб.-методич. пособие / О.Г. Чертов, А.С. Комаров, М.А. Надпорожская и др. СПб., Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007, 96 с.
- Чертов О.Г., Комаров А.С.** Теоретические подходы к моделированию динамики содержания органического вещества почв // Почвоведение, 2013, № 8, с. 937–946.
- Abakumov E.V., Abramov A.A., Aislabie J. et al.** The soil of Antarctica / Ed. by J. Bockheim. New York, Springer, 2015, 322 p.
- Bockheim J.G., Hall K.** Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica // South-African J. Sci., 2002, vol. 98, p. 82–90.
- Chertov O., Bhatti J., Komarov A. et al.** Influence of climate change, fire and harvest on the carbon dynamics of black spruce in Central Canada // Forest Ecology and Management, 2009, vol. 257, p. 941–950.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A. et al.** ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling // Ecolog. Modelling, 2001, vol. 138, No. 1–3, p. 289–308.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Bykhovets S.S., Kobak K.I.** Simulated soil organic matter dynamics in forests of the Leningrad administrative area, northwestern Russia // Forest Ecology and Management, 2002, vol. 169, No. 1–2, p. 29–44.
- Friedmann I.E.** Endolithic microorganisms in Antarctic cold desert // Science, 1982, vol. 215, p. 1045–1053.
- Kudeyarov V.N., Kurganova I.N.** Carbon dioxide emission and net primary production of Russian terrestrial ecosystems // Biology and Fertility of Soils, 1998, vol. 27, p. 246–250.
- Liski J., Palosuo T., Peltoniemi M., Sievänen R.** Carbon and decomposition model Yasso for forest soils // Ecolog. Modelling, 2005, vol. 189, p. 168–182.
- Longton R.E.** Biology of polar bryophytes and lichens. New York, Cambridge Univ. Press, 1988, 391 p.
- Mikhailov A.V., Komarov A.S., Chertov O.G.** Simulation of the carbon budget for different scenarios of forest management // Eurasian Soil Sci., 2004, vol. 37, sup. 1, p. 593–596.
- Nadporozhskaya M.A., Mohren G.M.J., Chertov O.G., Komarov A.S., Mikhailov A.V.** Dynamics of soil organic matter in primary and secondary forest succession on sandy soils in the Netherlands: an application of the ROMUL model // Ecolog. Modelling, 2006, vol. 190, p. 399–418.
- Renbin Zhu, Liguang Sun, Weixin Ding.** Nitrous oxide emissions from tundra soil and snowpack in the maritime Antarctic // Chemosphere, 2005, No. 59, p. 1667–1675.
- <http://www.carboperm.net/index.php?id=3> (дата обращения: 29.06.2016).

Поступила в редакцию  
1 июня 2015 г.