

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ БОЛОТ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА\*

С. А. РЕНЕВА

*Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия*

e-mail: svet@sr11359.spb.edu

Decomposition of the organic material under warmer climatic conditions will enhance the emission of methane to the atmosphere. Forecasts of changes in the volume of seasonal thawing were calculated using the permafrost model. Forecasts of changes of the methane emission for the mid-21st century climate were estimated using the methane model. According to our results emissions may increase by 80 % along the Russian Arctic coast, by 30–50 % in the central Siberia, and up to 20 % in the eastern and south-eastern parts of cryolitozone.

## Введение

В мерзлых болотах криолитозоны содержится около 455 Гт углерода [1], что составляет порядка 14 % от общего почвенного углерода всей суши. Изменение климата приведет к увеличению глубины сезонного протаивания и температуры многолетнемерзлых грунтов и изменению углеродного газообмена арктических почв. Целью данной работы является получение модельных оценок изменения эмиссии метана из многолетнемерзлых болот на территории России. Для получения таких оценок были разработаны модель вечной мерзлоты, при помощи которой рассчитывались изменения температурного режима, влажности и толщины слоя сезонного протаивания болот, и модель углеродного газообмена, которая использовалась для расчета изменений потоков метана в атмосферу.

## 1. Модель вечной мерзлоты

Модель основана на алгоритме, предложенном В.А. Кудрявцевым. Она предполагает последовательный расчет изменений среднегодовой температуры на различных вертикальных уровнях от поверхности снега или же верхней границы растительности при его отсутствии до поверхности грунта и уровня проникновения сезонного таяния [2]. Для проведе-

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российско-голландского проекта РФФИ-NWO (грант № 047.011.2001.003) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 04-05-64488 и № 03-05-64955-а).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2005.

ния расчетов использовались среднемесячные многолетние нормы температуры воздуха и осадков в узлах регулярной сетки с шагом  $0.5 \times 0.5^\circ$  по широте и долготе из базы данных геoinформационной системы ГеоИнф Государственного геологического института [3]. В прогностических расчетах были использованы сценарии изменения климата для одиннадцатилетних интервалов времени вокруг 2025, 2050 и 2080 годов по моделям общей циркуляции GFDL, NCAR и ECHAM-4. Многолетним нормам в каждом узле сетки давались приращения, значения которых определялись в соответствии с выбранным сценарием из ближайшего узла более грубой сетки моделей общей циркуляции.

## 2. Модель углеродного обмена

Модель учитывает три основных механизма транспорта метана в почвах: диффузию газа через поровое пространство, пузырьковый перенос и транспорт газа посредством растений. Диффузия метана описывается следующим уравнением:

$$\frac{dC_{\text{CH}_4}}{dt} = \frac{d}{dz} \left[ D \frac{dC_{\text{CH}_4}}{dz} + Q_b \right] + P_{\text{CH}_4} - O_{\text{CH}_4} + B_{\text{CH}_4}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{CH}_4}$  — общая концентрация метана на глубине  $z$  от поверхности почвы;  $D$  — коэффициент диффузии метана;  $Q_b$  — поток метана в виде пузырьков;  $P_{\text{CH}_4}$ ,  $O_{\text{CH}_4}$  — соответственно интенсивности производства и окисления метана;  $B_{\text{CH}_4}$  — интенсивность поглощения метана корневой системой.

Для определения этих параметров использовались полуэмпирические соотношения, предложенные в работе [4].

Окисление метана  $O_{\text{CH}_4}$  рассчитывалось с использованием уравнения Михаэлиса — Ментона:

$$O_{\text{CH}_4} = V_{\text{CH}_4 Q} \left( \frac{C_{\text{CH}_4}}{K_{\text{CH}_4} + C_{\text{CH}_4}} \right) \left( \frac{C_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2} + C_{\text{O}_2}} \right), \quad (2)$$

где  $K_{\text{CH}_4}$ ,  $K_{\text{O}_2}$  — константы Михаэлиса для метана и кислорода;  $C_{\text{O}_2}$  — концентрация кислорода в торфе;  $V_{\text{CH}_4 Q}$  — потенциальная скорость окисления метана, зависящая от влажности и температуры почвы, определяемых по экспериментальным данным.

Производство  $P_{\text{CH}_4}$  метана рассчитывалось с использованием уравнения

$$P_{\text{CH}_4} = \frac{V_{\text{CH}_4 P}}{1 + \eta C_{\text{O}_2}}. \quad (3)$$

Здесь  $V_{\text{CH}_4 P}$  — потенциальная скорость производства метана, зависящая от влажности и температуры почвы;  $\eta$  — параметр, определяющий чувствительность производства метана от концентрации кислорода.

Пузырьковый перенос метана  $Q_b$  рассчитывался по следующей формуле:

$$Q_b = k_b K C_{\text{CH}_4}, \quad (4)$$

где  $K$  — коэффициент влагопроводности почвы;  $k_b$  — подгоночный коэффициент.

В качестве начального условия (1) используется постоянное значение концентрации в профиле:

$$C_{\text{CH}_4} = C_{\text{CH}_4 0}, \quad t = 0. \quad (5)$$

Для задания нижнего граничного условия воспользуемся положением, что на уровне  $Z$  (например, минеральное дно болота) поток метана отсутствует, т. е.

$$\frac{dC_{\text{CH}_4}}{dz} = 0, \quad z = Z. \quad (6)$$

На верхней границе используется условие первого рода:

$$C_{\text{CH}_4} = C_{\text{CH}_4 a}, \quad z = 0, \quad (7)$$

где  $C_{\text{CH}_4 a}$  — концентрация метана в атмосфере.

Уравнение (1) в конечно-разностной форме решается методом прогонки.

Модельные расчеты проводились при различных значениях параметров, характеризующих растительный покров и потенциальную скорость производства и окисления метана. Пределы их изменения выбирались на основе экспериментальных данных, полученных, например, в работах [5, 6]. Диапазон изменения глубины протаивания составлял 5 . . . 80 см, температура различных горизонтов талого слоя почвы в теплый период года менялась от 5 до 25 °С. Расчет потоков метана проводился с шагом 1 ч на протяжении двух летних месяцев.

В результате анализа расчетов по описанной выше физически полной модели углеродного газообмена и сравнения их с данными наблюдений были получены зависимости, описывающие потоки метана  $J$  при изменении глубины протаивания и температуры грунта. Выражение для оценки относительной изменчивости потока метана от глубины протаивания имеет следующий вид:

$$J_1/J_0 = \sqrt{H_{d1}/H_{d0}}, \quad (8)$$

где  $J_0$  и  $J_1$  — потоки метана за два различных периода времени;  $H_{d0}$  и  $H_{d1}$  — соответствующие глубины протаивания.

Аналогичная зависимость от температуры грунта имеет вид

$$J_1/J_0 = \exp 0.1 (T_1 - T_0), \quad (9)$$

где  $T_0$  и  $T_1$  — температуры поверхности почвы за первый и второй периоды времени.

Объединив вместе (8) и (9), получаем обобщенную зависимость в виде

$$J_1/J_0 = \exp 0.1 (T_1 - T_0) \sqrt{H_{d1}/H_{d0}}. \quad (10)$$

### 3. Методика расчетов

Для проведения пространственно распределенных расчетов по моделям вечной мерзлоты и углеродного газообмена значения входных параметров были представлены в виде информационных слоев ГИС-формата с пространственным разрешением  $0.5 \times 0.5^\circ$  по широте и долготе. Поскольку наши оценки относятся к углеродному газообмену болот криолитозоны России, было определено, какую долю площади они занимают в каждой из ячеек используемой нами регулярной сетки. Для этого использовались цифровые контуры более чем 100 тыс. болот на территории России, из которых около 60 тыс. расположены в области вечной мерзлоты. По полученным нами данным, общая площадь болот криолитозоны России составляет около 365 тыс. км<sup>2</sup>.

Вначале были проведены расчеты изменения глубины сезонного протаивания, объема и температуры талого слоя торфа для трех климатических сценариев (GFDL, NCAR и ECHAM-4) на середину 21 века. При помощи этих данных по обобщенной зависимости (10) были рассчитаны ожидаемые к середине 21 века изменения потоков метана относительно их современного значения. Из трех используемых сценариев GFDL дает среднюю оценку, которая показана на рис. 1, а два других сценария, отличаясь от нее в меньшую и большую стороны, дают представление о неопределенности прогноза, обусловленной неточным знанием климатических условий будущего.

Расчет указывает на то, что увеличение эмиссии метана из многолетнемерзлых болот будет достигать наибольших значений в наиболее холодной части сплошной криолитозоны. На отдельных участках, примыкающих к арктическому побережью, эмиссия может вырасти более чем на 80%. Необходимо при этом учитывать, что в этой области ее современная величина незначительна из-за короткого теплого периода и малой глубины сезонного протаивания. На большей части прерывистой криолитозоны прогнозируемое изменение эмиссии метана составит от 30 до 50%. В наименьшей степени изменения коснутся эмиссии метана в болотах восточной и юго-восточной частей криолитозоны, где по данным расчета она увеличится не более чем на 20%. Можно отметить, что расчетное изменение эмиссии метана еще более заметно отличается от широтно-зонального, чем прогноз глубины сезонного протаивания болот.

Наибольший интерес представляет вопрос о том, насколько сильно такие прогнозируемые изменения повлияют на общий баланс источников и стоков метана в атмосфере. Известно, что метан является мощным парниковым газом, радиационное воздействие которого более чем в 20 раз превышает воздействие равного количества углекислого газа. Концентрация метана в атмосфере растет со скоростью 0.5–1% в год, что намного превы-

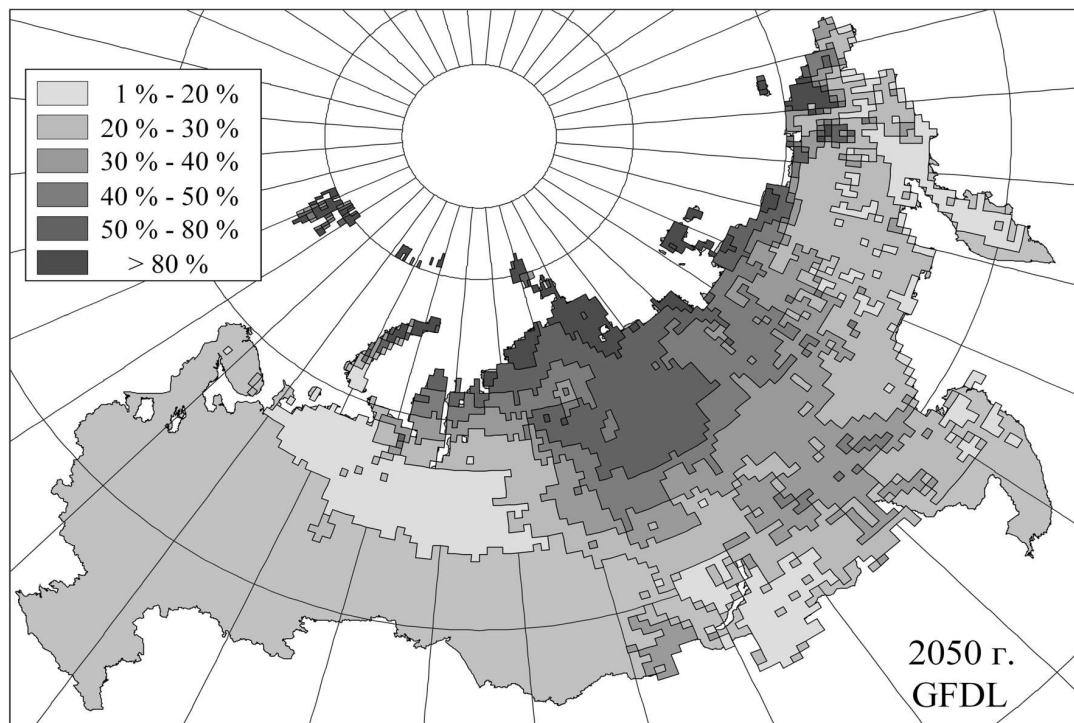


Рис. 1. Прогнозируемое изменение эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России, % от современной нормы.

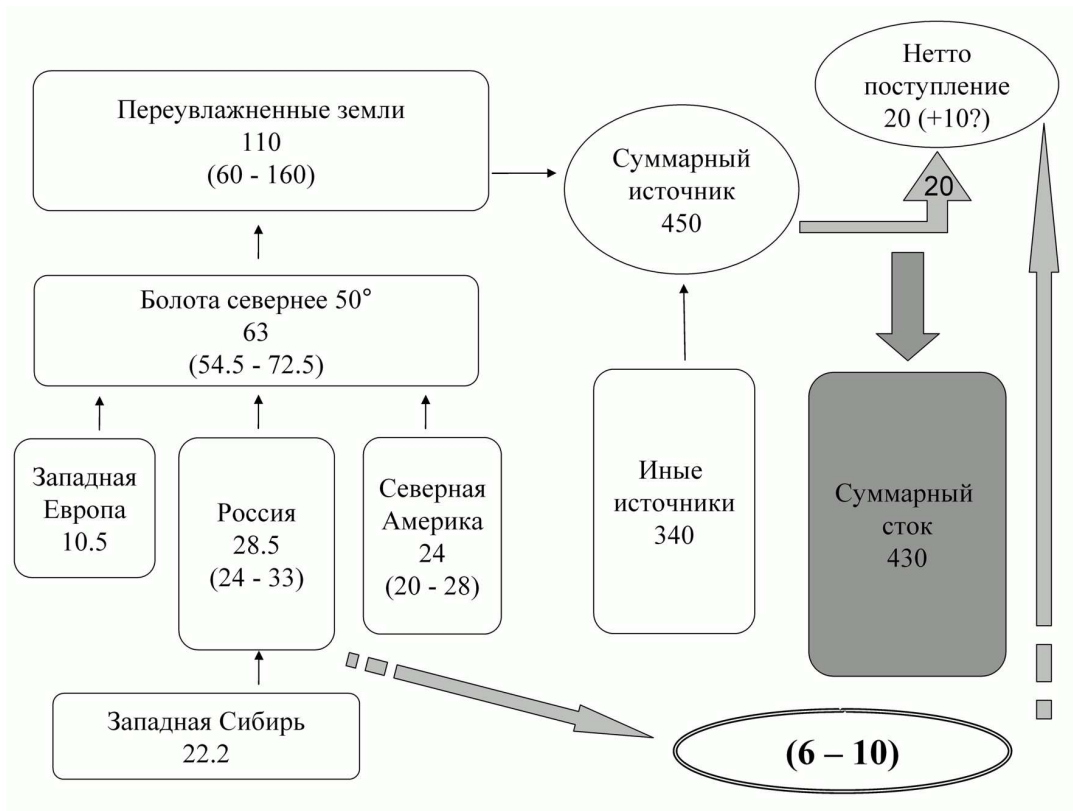


Рис. 2. Некоторые современные источники и глобальный сток атмосферного метана, млн т/год.

пает скорость роста углекислого газа и вызывает серьезные опасения в связи с проблемой глобального потепления.

Для оценки парникового эффекта, прогнозируемого увеличения эмиссии болотного метана криолитозоны России целесообразно обратиться к рис. 2, на котором показано современное соотношение различных источников и глобального стока атмосферного метана. Согласно этим данным ежегодное нетто-приращение составляет 20 млн т, в то время как полученные нами оценки могут увеличить его на 6–10 млн т, т. е. на 30–50%. Из этого следует, что эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России является климатообразующим фактором, который в последующие несколько десятилетий может привести к заметному глобальному потеплению.

## Список литературы

- [1] Горнам Е. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecological Appl.* 1991. N 2. P. 182–195.
- [2] Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогноз и оценка неопределенности // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* СПб.: Гидрометеиздат, 2003. С. 21–38.
- [3] Анисимов О.А., Поляков В. Информационная система для оценки последствий изменения климата в области криолитозоны // *Криосфера Земли.* 1998. № 3. С. 91–95.

- [4] АРАН J.R.M., СТЕПЕН K.D. A model of the processes leading to methane emission from peatland // Atmospheric Environment. 1998. N 19. P. 3257–3264.
- [5] JENNIFER Y.K., WILLIAM S.R., SHANNON K.R. Methane emission and transport by arctic sedges in Alaska: Results of a vegetation removal experiment // J. of Geophysical Research. 1998. N 103 (D22). P. 83–92.
- [6] WAGNER D., КОБАВЕ S., ПФЕЙФЕР E.M., ХУББЕРТЕН H.W. Microbial controls on methane fluxes from polygonal tundra of the Lena delta, Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 2003. N 14. P. 173–185.

*Поступила в редакцию 2 июня 2005 г.*