

*И.А. Судаков*

**АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ И АЛГОРИТМИЧЕСКИХ  
ОСОБЕННОСТЕЙ НОВОГО МЕТАНОВОГО МОДУЛЯ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ ГЛОБАЛЬНО-ВЕГЕТАЦИОННОЙ  
МОДЕЛИ LPJ**

*I.A. Sudakov*

**ANALYSIS OF PHYSICAL BASIS AND ALGORITHMIC  
SPECIFIC FEATURES OF NEW METHANE MODULE  
OF DYNAMIC GLOBAL VEGETATION MODEL LPJ**

*В статье проанализированы физические основы и алгоритмические особенности модели LPJ-WhyMe (Lund-Potsdam-Jena Wetland Hydrology and Methane Emissions), которая на сегодняшний день является одной из наиболее перспективных для моделирования эмиссии метана из различных образований криолитозоны Земли. Учет проанализированных в статье особенностей LPJ-WhyMe будет полезен при выполнении, на её основе, численных экспериментов по моделированию эмиссии метана из тающей вечной мерзлоты, а также для интерпретации полученных результатов.*

*Ключевые слова: моделирование климата, эмиссия метана, вечная мерзлота, алгоритм, модель LPJ-WhyMe.*

*Analyzed in this paper are physical basis and algorithm specific features of the LPJ-WhyMe (Lund-Potsdam-Jena Wetland Hydrology and Methane Emissions) model which today is one of the most perspective models for simulations of methane emissions from permafrost. Taking into account specific features of LPJ-WhyMe model, analysed in this paper, will be useful for simulations of methane emissions from thawing permafrost and analysis of modelling results.*

*Key words: climate modelling, methane emission, permafrost, algorithm, LPJ model.*

## **Введение**

Модели семейства **LPJ** (Lund-Potsdam-Jena) – это модели, описывающие крупномасштабные процессы динамики наземной растительности в сочетании с углеродным циклом в системе «земная поверхность – атмосфера» и сопутствующими гидрологическими процессами на основе входных климатических, гидрометеорологических и почвенных данных. Модели указанного семейства состоят из модулей (блоков), включающих процессы фотосинтеза, транспирации, популяционной динамики, органических процессов в почве, лесных пожаров и т. п. [17].

Модель **LPJ-WhyMe** (Lund-Potsdam-Jena Wetland Hydrology and Methane Emissions), являющаяся предметом рассмотрения в настоящей работе, предназначена для моделирования процессов образования и эмиссии метана из торфяников, расположенных на вечномерзлых грунтах. Впервые модуль, стимулирующий эмиссию метана из северных торфяников, включен непосредственно

в динамическую глобальную модель растительности, которой является LPJ [19]. Торфяники субарктического региона, в основном локализованные в зоне вечной мерзлоты, содержат крупные запасы почвенного углерода и могут вносить значительный вклад в общий глобальный объем выбросов метана. При этом, с одной стороны, их относительный вклад в настоящее время возрастает в связи с наблюдающимся глобальным потеплением. Более того, это возрастание будет всё более значительным по мере дальнейшего роста температуры и осадков, что происходит быстрее как раз в высоких северных широтах по сравнению с другими регионами. С другой стороны, современные климатические модели показывают, что увеличение концентрации метана в атмосфере может привести к усилению «парникового эффекта» и дальнейшему увеличению средней глобальной температуры климатической системы Земли (явление положительной обратной связи в климатической системе). В связи с этим проблема моделирования эмиссии метана из вечной мерзлоты очень актуальна. Однако в настоящее время наблюдается недостаток предназначенных для этого надежных моделей. В этом плане LPJ-WhyMe как раз и является такой моделью, на основе которой возможно оценить влияние будущего изменения климата на эмиссию метана из торфяников вечной мерзлоты и величину соответствующей положительной обратной связи. Более того, эта модель вообще является одним из лучших вариантов решения данной проблемы. Она находится в открытом доступе, имеет подробнейшее описание, основана на механистическом подходе и предполагает минимальное использование эмпирических соотношений и параметров, имеет достаточно надежную численную схему, хорошую базовую основу (создана на основе модулей модели LPJ) и предполагает использование достаточно небольшого количества формализованных климатических, гидрометеорологических и других специфических входных параметров.

Таким образом, целью настоящей работы является анализ некоторых физических и алгоритмических особенностей новой метановой модификации динамической глобально-вегетационной модели LPJ-WhyMe, чтобы показать её достоинства и недостатки, что необходимо для повышения качества и надёжности будущих численных экспериментов.

### **Краткое описание модели LPJ-WhyMe и её метанового модуля**

Модель LPJ-WhyMe, первоначально описанная в [19], представляет собой дальнейшее развитие модели LPJ посредством включения в неё дополнительного модуля для моделирования эмиссии метана из северных торфяников. Для этого в модель LPJ введены модельные блоки динамики термического режима вечной мерзлоты, гидрологии торфяников, а также функции, позволяющие детально моделировать популяционную динамику растительности для торфяников. Это потребовало введения в модель двух новых функциональных типов растений (Plant Functional Type (PFT)), описывающих торфяники и разложение органического материала в торфяной среде. Термический режим вечной мерз-

лоты, на которой расположены торфяники, описывается в модели краевой задачи на основе уравнения теплопроводности, численное решение которой производится на основе метода Кранка-Николсона. Метановый модуль моделирует образование метана, его окисление и транспорт посредством молекулярной диффузии, переноса через растения и пузырькового переноса.

Схема процессов, лежащих в основе метанового модуля модели LPJ-WhyMe, приведена на рис. 1 [19]. Эмиссия метана в атмосферу определяется разностью между его образованием и окислением. Производится метан метанопродуцирующими бактериями в анаэробных условиях. Углерод для этих бактерий, берущийся из потенциальных запасов органического вещества, распределён в почвенных слоях в зависимости от плотности распределения корней растений – больше углерода находится в верхних слоях, где корневая плотность наибольшая. В результате деятельности метанопродуцирующих бактерий углерод в почве декомпозируется на метан и двуокись углерода. Кислород, необходимый для окисления метана аэробными метанотропными бактериями, поступает в почву из атмосферы как за счёт молекулярной диффузии через слой грунта, так и диффузии через сосудисто-корневую систему растений. Количество кислорода определяет, сколько метана окисляется и превращается в углекислый газ. Образовавшийся метан поступает далее в атмосферу тремя способами: посредством молекулярной диффузии через вышележащие слои грунта, непосредственно за счёт диффузии через сосудисто-корневую систему растений и в виде пузырькового переноса газообразного метана. Уравнение диффузии в рассматриваемом метановом модуле решается посредством численной схемы Кранка-Николсона.

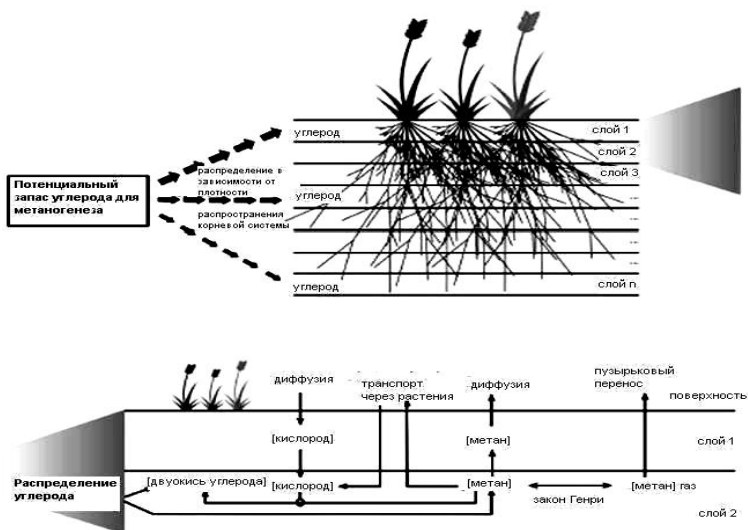


Рис. 1. Схематическое изображение процессов, лежащих в основе метанового модуля модели LPJ-WhyMe [19]

### Физические особенности модели

Как неоднократно подчеркивалось разработчиками модели LPJ-WhyMe, её главным достоинством является нехарактерный для такого рода моделей акцент на применение фундаментальных физических законов взамен использования большого числа эмпирических соотношений, описывающих процессы образования и переноса метана [19].

Остановимся на некоторых концептуальных особенностях данной модели. Здесь в первую очередь необходимо обратить внимание на корректность применения закона Генри [16], в котором используется безразмерное отношение концентраций метана в газовой фазе и растворенного в воде (здесь и далее будем употреблять слово «фаза», когда речь идет о нахождении метана в слое грунта в газовом состоянии либо в растворенном виде в грунтовой воде). Как выяснилось, основная проблема применения закона Генри в рассматриваемой модели состоит в том, что в ней в качестве соответствующих концентраций метана применяются концентрации, рассчитываемые исходя из количества  $\text{CH}_4$  в той или иной фазе во всём объёме системы в целом. Закон же Генри предполагает использование концентраций, рассчитываемых из количества метана в определённой фазе, находящегося в объёме, непосредственно занимаемом этой фазой. Это различие является фундаментальным, поэтому некорректное применение данного закона в модели LPJ-WhyMe приводит к моделированию физически необъективной ситуации.

Таким образом, для того чтобы корректно применять закон Генри, необходимо иметь сведения о фракциях метана, находящегося в газовой фазе и растворенного в воде в поровых пространствах в каждом слое торфа. Однако слои торфа являются полностью затопленными, что не позволяет решить эту проблему напрямую. Для ее решения можно, однако, использовать подход, описанный в [18], в котором принимается, что объем метана в газовой фазе составляет приблизительно 10% от всего количества метана в слое торфа. Теперь, зная общую концентрацию метана в конкретном слое торфа, например, из данных наблюдений, и оценив его концентрацию в газообразной фазе, на основе закона Генри можно вычислить и концентрацию метана, растворенного в воде.

В модели для описания пузырькового переноса (образование и всплытие метановых пузырей) используется концентрация метана, растворенного в воде, заполняющей поры торфа. Она вычисляется, как было показано выше, с помощью закона Генри исходя из известной концентрации газообразного метана. Однако закон Генри описывает случай, когда обе фазы (газообразный и растворенный метан) находятся в состоянии равновесия. Процесс же образования пузырей – это фазовый переход первого рода и поэтому является неравновесным. Отсюда следует, что применение закона Генри для описания неравновесного процесса образования метановых пузырей, вообще говоря, недопустимо. Эта проблема могла бы быть решена путем включения в модель LPJ-WhyMe динамической модели образования метановых пузырей. К сожалению, на данном

этапе развития модели реализовать динамическую модель образования пузырей метана не удастся из-за наличия сильной зависимости этого процесса от параметров почвы и химических характеристик окружающей среды, которые, как правило, неизвестны.

Для описания процессов молекулярной диффузии метана в вышележащем грунте в модели LPJ-WHyMe используется эмпирическое соотношение вида  $D = a + bT$  (где  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии и  $T$ , °C – температура почвенного слоя), предполагающее линейную зависимость коэффициента диффузии от температуры почвы. При этом коэффициенты  $a$  и  $b$  находятся экспериментально. Методами статистической термодинамики было показано, что коэффициент  $b$  должен всегда находиться в интервале между 1,5 и 2,0 [16]. Для диапазона температур, используемого в модели LPJ-WHyMe [19] и равного (5–35) °C, это условие выполняется. Обычно верхний предел этого диапазона не превышает в используемых входных данных, но часто при моделировании используется температура ниже 5 °C. В этом случае коэффициент  $b$  может не попадать в диапазон 1,5–2,0. Возникающая из-за этого ошибка, однако, будет мала по причинам того, что границы рассматриваемого температурного интервала расширяются только до 0 °C (ниже нуля градусов вода в почве будет замерзать, и процессы диффузии будут прекращаться).

### **Алгоритмические особенности модели**

На основе детального анализа модели LPJ-WhyMe были выявлены также её основные алгоритмические достоинства и недостатки.

Основным достоинством модели является то, что она использует только стандартные климатические параметры в качестве входных и имеет достаточно высокое пространственное разрешение (на сетке  $1^\circ \times 1^\circ$ ) для описания процессов в циркумполярном регионе. Минимальное количество входных климатических параметров, таких, как температура, осадки, количество влажных дней, процент облачности, атмосферная концентрация  $\text{CO}_2$ , тип почвы (8 классов) и доля торфяников от общей изучаемой площади обеспечивает, тем не менее, моделирование всех основных характеристик: температуры почвы, позиции грунтовых вод, глубины протаивания вечной мерзлоты и эмиссии метана.

В алгоритмах модели заложено, что шаг по времени составляет 15 мин для расчета диффузии метана, 0,5 суток для определения термического режима грунтов и одни сутки или более для всех других процессов, т.е. при решении уравнения теплопроводности и уравнения диффузии метана итерация переноса метана опережает итерацию температуры вечной мерзлоты. Так, при тестировании рассматриваемой модели оказалось, что моделирование с учетом среднесуточных значений температуры воздуха приводит к появлению неустойчивости численной схемы. Это можно объяснить тем, что температура воздуха, являющаяся граничным условием в рассматриваемых уравнениях переноса тепла и метана, является быстро изменяющимся параметром относительно термическо-

го режима и медленно изменяющимся параметром относительно транспорта метана, хотя схема Кранка-Николсона используется для решения обоих уравнений переноса одновременно. Например, если в алгоритме разделить схемы решений уравнений переноса и задавать входные параметры для каждого конкретного уравнения отдельно, то это ставит под сомнение использование численной схемы Кранка-Николсона (которая была выбрана специально для универсализации решений уравнения переноса тепла и метана) и увеличивает потребность в вычислительных ресурсах. Таким образом, наиболее достоверные результаты вычислений с помощью рассматриваемой модели можно получить, только начиная с задания среднемесячных значений входных данных. Такой выбор обеспечивает постоянство граничного условия для большого числа итераций по времени в численной схеме рассматриваемых уравнений переноса.

Другим важным недостатком является то, что алгоритмом модели не заложено разграничение между торфяниками и болотами, являющимися разными типами водно-болотных экосистем. Однако процессы, происходящие в этих типах экосистем, имеют существенно различные физические основы [11], например, для эмиссии метана [6]. Возможным решением данной проблемы могло бы быть введение в алгоритм некоего «переключателя» между типами водно-болотных экосистем при усвоении входных данных. К сожалению, это решение трудно реализуемо технически, так как требует более подробной алгоритмизации гидрологического режима, что не так просто в рамках динамической глобально-вегетационной модели. Таким образом, сведение модели к рассмотрению только одного типа экосистем (например, вечномерзлых торфяников) выводит её, по сути, из класса глобальных моделей и нарушает алгоритмическую схему вычисления эмиссии метана, которая рассматривается для всего циркумполярного региона. Вообще говоря, до сих пор существует трудность в классификации типов водно-болотных угодий. Некоторые рекомендации по решению этой проблемы выработаны сетью PEATNET [14]. Необходимо отметить также, что данная модель не предусматривает детального описания типов растительности на конкретных участках сетки, так как для глобального или регионального моделирования это привело бы к огромному потоку входных данных и накоплению большой ошибки в вычислениях.

Ещё один недостаток модели связан с тем, что в ней использована гидрологическая схема [7], которая позволяет моделировать гидрологические процессы в грунтовых водах в интервале от 10 см выше торфяной поверхности и до 30 см ниже этой поверхности. Данный недостаток приводит к тому, что моделирование процессов с низкой скоростью метанолиза в торфяниках представляется невозможным, так как эти процессы происходят на глубинах больше 30 см.

Дополнительно отметим, что в данной модели в качестве основы для описания динамики растительности и поверхностных процессов используются карты из системы Global Soil Data Products (IGBP-DIS) [2], созданной еще в начале 2000-х годов и не обновляемой по сегодняшний день. Для улучшения описания

этих процессов возможно, однако, использовать в качестве основы карты из Global Lakes and Wetlands Databas (GLWD) [10] или подход, используемый в [1].

В любом крупномасштабном моделировании эмиссии метана из водно-болотных экосистем существенным является значение даун-скейлинга, характеризующее степень детализации задания их топографии. С одной стороны, в модели значение даун-скейлинга выбрано равным 75 %, будучи полученным на основании мелкомасштабных (полевых) оценок микротопографии болот. С другой стороны, пространственное разрешение, используемое в рассматриваемой модели для моделирования эмиссии метана, составляет  $1^\circ \times 1^\circ$  по сетке. При таком разрешении в областях, идентифицируемых как водно-болотные экосистемы, могут также находиться леса, реки и другие неоднородности рельефа [13]. Поэтому для валидации выбранного значения даун-скейлинга, следуя методологии, описанной в [13], при каждом моделировании необходимо либо сравнивать полученные потоки метана с доступными данными наблюдений – оценками эмиссии метана для нескольких крупных региональных участков водно-болотных экосистем, либо использовать алгоритм, разработанный в [1].

### **Тестовые испытания модели**

Проведем тестовые испытания модели и рассмотрим, как приведенные выше физические и алгоритмические особенности влияют на результат моделирования. Для этого выберем тестовый полигон, где наиболее точно и регулярно проводят измерения потоков метана из вечной мерзлоты. Полигон Стордален при научно-исследовательской станции Абиско в Швеции ( $68^\circ$  с.ш.,  $19^\circ$  в.д.) является наиболее надежным для наших тестовых оценок: здесь наблюдения за потоками метана из почв ведутся круглогодично, на высоком методическом уровне (имеется специальная измерительная башня) и наиболее доступны [8, 15]. Полигон располагается на вечной мерзлоте прерывистого типа в субарктическом климате со среднегодовой температурой воздуха  $-0,7^\circ\text{C}$ , среднегодовое количество осадков – 300 мм [4]. Средне значение активного слоя вечной мерзлоты находилось здесь в последнее десятилетие в пределах от 70 до 80 см. Торфяники этого полигона характеризуются большим количеством топей и скудной растительностью с преобладанием мха [9].

Для моделирования эмиссии метана на полигоне Стордален с помощью модели LPJ-WhyMe мы использовали входные климатические данные (месячные температуры воздуха и данные об облачности, месячное количество осадков и месячное число дождливых дней) на ячейке  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  из базы климатических данных Climate Research Unit time series data CRU TS 2.1 [12]. Данные о типах почв и растительности по умолчанию заданы в модели. Значение атмосферной концентрации углекислого газа было найдено в [5].

На рис. 2 представлен результат моделирования разных типов эмиссии метана на полигоне Стордален в течение 2006 г.

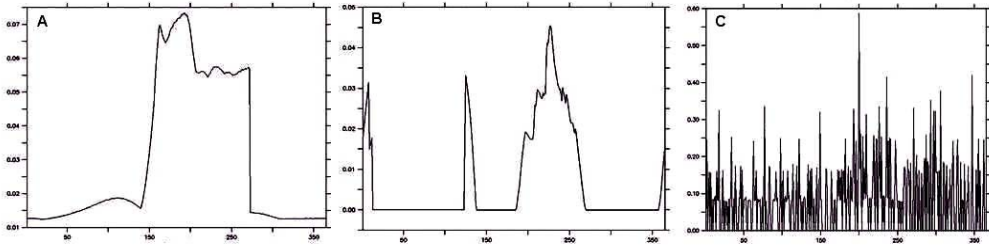


Рис. 2. Потоки метана (по оси  $Y$  – в  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{д}^{-1}$ ) в течение года (по оси  $X$  – в сутках) при различных типах эмиссии на полигоне Стордален.  
 А – корневой перенос; В – диффузионный перенос; С – пузырьковый перенос

Как видно из результатов моделирования (рис. 2), основной вклад в эмиссию метана дает пузырьковый перенос метана (максимум до  $0,6 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{д}^{-1}$ ). Корневой перенос и диффузионный перенос на этом фоне выглядит достаточно малым (максимум до  $0,08 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{д}^{-1}$ ). Малый вклад этих двух типов транспорта метана можно объяснить небольшим количеством растительности (которая сконцентрирована в основном в заводах и топях) и неоднородностью почвенного покрова полигона. Но ни какими реальными физическими процессами, происходящими на полигоне, не удастся объяснить столь высокий вклад пузырькового переноса в общие потоки метана. В рассматриваемом районе уровень торфяных вод достаточно низок (до 9 см), что не способствует развитию процессов пузырькового переноса метана. Так, уже отмечалось ранее, что изначально в модели для процессов пузырькового переноса была заложена физически некорректная схема применения Закона Генри, поэтому достоверность моделирования с большим вкладом пузырькового переноса метана можно считать достаточно низкой.

Для верификации данных мы провели сравнение результатов моделирования с наблюдательными данными и данными модели PEATLAND-VU [8, 15]. Эта модель основана на модели эмиссии метана Уолтера-Хейманна [8] и по своей структуре подобна модели LPJ-WHyMe (также моделируется три типа переноса метана), однако она основывается только на связи эмпирических уравнений для описания процессов метаногенеза и газопереноса и компоновки блоков других моделей [8]. В этом смысле модель PEATLAND-VU значительно уступает модели LPJ-WHyMe, в основе которой лежит глобально-вегетационная модель, основанная на фундаментальных законах.

На рис. 3 проведены результаты полиномиальной аппроксимации общих потоков метана (при всех типах переноса) за 2006 г. при моделировании с помощью моделей PEATLAND-VU [8] и LPJ-WHyMe, а также наблюдаемых на экспериментальном полигоне [15].

Полиномиальная аппроксимация показывает, что моделируемая LPJ-WHyMe эмиссия метана меньше наблюдаемой (максимумы отличаются на  $0,1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{д}^{-1}$ ) и значительно меньше моделируемой PEATLAND-VU (максиму-



мы отличаются на  $0,3 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{д}^{-1}$ ). К тому же модель LPJ-WHyMe не дает четкого максимума для эмиссии метана, характерного для осеннего периода (в отличие от наблюдаемых и моделируемых PEATLAND-VU значений, для которых наблюдается четкий максимум). Кроме того, общая эмиссия метана за указанный период составляет  $9,0 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  – при вычислении на модели LPJ-WHyMe;  $30,8 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  – при расчетах на модели PEATLAND-VU;  $24,5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  – при наблюдениях. Таким образом, видно, что модель LPJ-WHyMe не может в полной мере описывать потоки метана для изучаемого полигона. Это можно объяснить несколькими причинами:

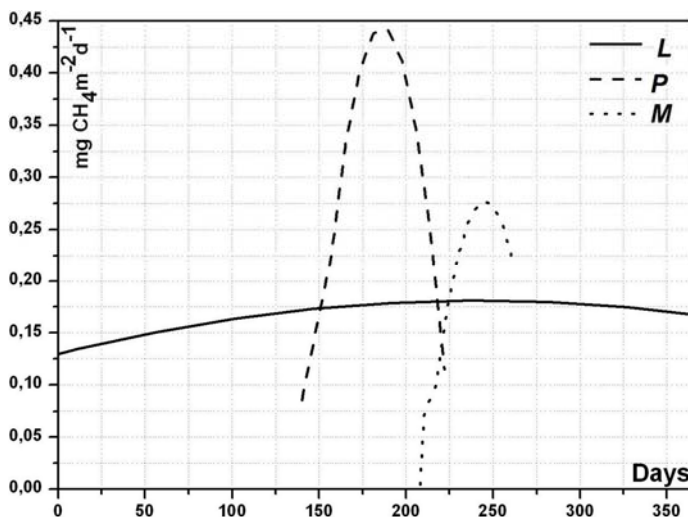


Рис. 3. Полиномиальные аппроксимации общих потоков метана за год на полигоне Стордален: *L* – вычисленных с помощью модели LPJ-WHyMe, *P* – вычисленных с помощью модели PEATLAND-VU, *M* – измеренных (по оси *Y* – потоки метана в  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{д}^{-1}$ , по оси *X* – время в сутках)

1. Основной вклад в эмиссию метана из мерзлотных торфяников на севере Швеции дают процессы, не связанные с биогенной эмиссией метана (и, соответственно, с тремя типами переносов); этот вопрос требует дополнительных исследований, некоторые из которых приведены в [3].

2. Небольшое разрешение моделируемой поверхности  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  (по сравнению с маленькой площадью полигона) и стремление «уложить» моделируемый участок в стандартные климатические ячейки моделирования (т.е. привязать ячейку, в которую попадает полигон к наиболее близкой ячейке, для которой входящие климатические параметры модели наиболее точно определены) не позволяют достаточно точно описать тип почв и растительности полигона, что, в свою очередь, уменьшает адекватность моделирования корневого и диффузионного транспорта метана.

3. По-видимому, для моделирования эмиссии метана на конкретных полигонах лучше использовать модель PEATLAND-VU, которая основана на кон-

кретных эмпирических соотношениях для данного региона. В свою очередь, модель LPJ-WHyMe создана на основе глобально-вегетационной модели и дает гораздо более точные и устойчивые результаты для крупномасштабного моделирования [19].

### **Заключение**

В настоящее время основным прогностическим инструментом климатических исследований является использование разнообразных моделей климата. Особое место среди них занимают динамические глобально-вегетационные модели, которые не только хорошо моделируют динамику растительности, но и достаточно точно описывают углеродный цикл в глобальном и региональном масштабах. Благодаря этому такие модели имеют широкую перспективу для их использования в качестве блоков глобальных климатических моделей и моделей экосистем, глобальных и региональных. Так, модель LPJ-WhyMe может применяться для решения очень актуальной проблемы – изучения эмиссии метана из вечномерзлых торфяников.

Развитие современных компьютерных технологий не предполагает детального знакомства исследователей с алгоритмами и физическими основами моделей. Обычно пользователи запускают и используют корпоративные модели по определенному алгоритму, работая только с входными и выходными данными. При таком подходе могут возникать неопределенности в интерпретации результатов, причина которых может крыться в недопонимании алгоритмических и физических основ модели.

В данной работе авторы описали ряд алгоритмических и физических достоинств и недостатков модели LPJ-WHyMe. В целом, к преимуществам модели относятся её базирование на фундаментальных физических законах в сочетании только с самыми необходимыми эмпирическими уравнениями, подробно описывающими все три типа метанового переноса в торфяной среде. Кроме того, LPJ-WHyMe требует в качестве входных только стандартные климатические параметры (доступные, на сегодняшний день, в любых климатических базах данных) и имеет относительно высокое (по сравнению с другими моделями) пространственное разрешение. К ее основным недостаткам можно отнести наличие некоторых алгоритмических упрощений. Так, в алгоритме не заложено разграничение между торфяниками и болотами, наложено жесткое ограничение на гидрологическую схему, имеется проблема выбора значения даунскейлинга, численная схема одновременного решения уравнений переноса тепла и метана становится неустойчивой при достаточно медленном или быстром изменении граничных условий и др. К тому же авторы модели не совсем корректно применяют закон Генри для описания различных типов переноса метана.

Из проведенного тестового моделирования следует, что требуется дополнительная работа по улучшению концепции схемы моделирования пузырькового переноса метана, а также необходимы дополнительные исследования досто-

верности результатов в зависимости от вида моделирования: мелкомасштабного, крупномасштабного, глобального. Необходимо вычислить ошибку, которая будет накапливаться при этих разных видах моделирования (в зависимости от разрешения по модельной сетке). Региональная параметризация гидрологической, почвенной и растительной схем данной модели может значительно улучшить результаты моделирований для конкретных регионов.

Несомненно, учет этих особенностей при интерпретации результатов моделирования с помощью модели LPJ-WHyMe поможет исследователям правильно выполнять численные эксперименты и добиваться наилучших результатов.

### **Литература**

1. *Bergamaschi P., Krol M., Meirink J. F., Dentener F., Segers A., van Aardenne J., Monni S., Vermeulen A., Schmidt M., Ramonet M., Yver C., Meinhardt F., Nisbet E.G., Fisher R., O'Doherty S., Dlugokencky E.J.* Inverse modeling of European CH<sub>4</sub> emissions 2001–2006 // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115(D22309). doi:10.1029/2010JD014180.
2. *Carter A. J., Scholes R. J.* SoilData v2.0: Generating a Global Database of Soil Properties CSIR Environmentek, Pretoria, South Africa, 2000 (CD-ROM).
3. *Cronk J. K., Fennessy M. S.* Wetland Plants: Biology and Ecology, CRC Press LLC, 2001.
4. *Christensen T. R., Johansson T., Akerman H. J., Mastepanov M., Malmer N., Friborg T., Crill P., Svensson B. H.* Thawing sub-arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions. *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31. L04501. doi:10.1029/2003GL018680.
5. *Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.M., Morgan V.I.* // Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101. P. 4115–4128.
6. *Frolking S., Roulet N., Fuglestedt J.* The impact of a northern peatland on the earth's radiative budget: sustained methane emission versus sustained carbon sequestration // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. G01008. doi:10.1029/2005JG000091.
7. *Granberg G., Grip H., Ottosson Loefvenius M., Sundh I., Svensson B.H., Nilsson M.* A simple model for simulation of water content, soil frost, and soil temperatures in boreal mixed mires // *Water Resour. Res.* 1999. Vol. 35(12). P. 3771–3782.
8. *Huissteden J., Petrescu A.M.R., Hendriks D.M.D., Rebel K.T.* Sensitivity analysis of a wetland methane emission model based on temperate and arctic wetland sites// *Biogeosciences.* 2009. Vol. 6. P. 3035–3051. doi:10.5194/bg-6-3035-2009
9. *Jackowicz-Korczynski M., Christensen T. R., Backstrand K., Crill P., Friborg T., Mastepanov M., Strom L.* Annual cycles of methane emission from a subarctic peatland // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, doi:10.1029/2008JG000913.
10. *Lehner B., Döll P.* Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // *Journal of Hydrology.* 2004. Vol. 296/1–4. P. 1–22.
11. *Lerman A.* Geochemical Processes. Water and Sediment Environments. New York: Wiley, 1979. 481 pp.
12. *Mitchell T. D., Jones P. D.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // *Int. J. Climatol.* 2005. Vol. 25. P. 693–712.
13. *Moore T. R., Heyes A., Roulet N. T.* Methane emissions from wetlands, southern Hudson Bay lowland // *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99(D1). P. 1455–1467. doi:10.1029/93JD02457.
14. *Peatland Ecosystem Analysis and Training NETwork (PEATNET)* — Official Website [Electronic resource] / [U.S.A, Illinois], [2008]. Mode of access: <http://www.peatnet.siu.edu/>. (Data of request: 01.12.2010).
15. *Petrescu A. M. R., van Huissteden J., Jackowicz-Korczynski M., Yurova A., Christensen T. R., Crill P. M., Backstrand K., Maximov T. C.* Modelling CH<sub>4</sub> emissions from arctic wetlands: effects of hydrological parameterization // *Biogeosciences.* 2008 Vol. 5. P. 111–121.

16. *Reid R.C.* Properties of gases and liquids, 4th ed., McGraw-Hill, New York. 1987, 435 pp.
17. *Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J., Levis S., Lucht W., Sykes M., Thonicke K., Venevski S.* Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Vegetation Model // *Global Change Biology*. 2003. Vol. 9. P. 161-185.
18. *Tokida T., Miyazaka T., Mizoguchi M., Nagata O., Takakai F., Kagemoto A., Natano R.* Falling atmospheric pressure as a trigger for methane ebullition from peatland // *Global Biogeochem. Cycles*. 2007. Vol. 21. doi:10.1029/2006GB002790.
19. *Wania R., Ross I., Prentice I.C.* Implementation and evaluation of a new methane model within a dynamic global vegetation model: LPJ-WHyMe v1.3.1 // *Geoscientific Model Development*. 2010. Vol. 3. P. 565—584. *Worthy D. E. J., Levin I., Hopper F., Ernst M. K., Trivett N. B. A.* Evidence for a link between climate and northern wetland methane emissions // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105(D3). P. 4031-4038.

Работа выполнена при финансовой поддержке Исследовательского Совета Норвегии (Research Council of Norway) в рамках проекта YGGDRASIL № 195740/V11, Министерства образования и науки Германии (грант № OSL-11-21), а также Декартовской программы исследований климата и окружающей среды Арктики и Суб-Арктики, выполняемой в Нансен-центрах в Санкт-Петербурге и Бергене (Норвегия).