

УДК 551.581.1; 551.584.33; 551.343; 556

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ ОЗЁР ЗОНЫ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

© 2011 г. В. М. Степаненко\*, Е. Е. Мачульская\*, М. В. Глаголев\*\*, \*\*\*\*, В. Н. Лыкосов\*\*\*\*

\* Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова  
119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 4

E-mail: vstepanenkomeister@gmail.com, ek.machulskaya@googlemail.com

\*\* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119992 Москва, Ленинские горы

E-mail: m\_glagolev@mail.ru

\*\*\* Институт вычислительной математики РАН

119991 Москва, ул. Губкина, 8

E-mail: lykossov@inm.ras.ru

\*\*\*\* Югорский государственный университет

628012 Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Поступила в редакцию 22.06.2010 г., после доработки 31.08.2010 г.

Представлен краткий обзор приведенных в литературе данных наблюдений потоков метана в атмосферу на болотах и озерах зоны вечной мерзлоты. Рассмотрены подходы к моделированию эмиссии метана с болот, приводятся их достоинства и недостатки, в частности, с точки зрения их сопряжения с климатическими моделями. Описывается разработанная авторами одномерная модель генерации, переноса и стока метана в системе “грунт–водоем”, сопряженная с гидротермодинамической моделью водоема. В модели применены как подходы, используемые в аналогичных моделях для болот, так и новые параметризации, описывающие специфические для озер процессы. Так, предложена параметризация генерации метана вблизи нижней границы талой зоны грунта под водоемом (“талика”). Приводятся результаты калибровки модели с привлечением доступных данных наблюдений эмиссии метана на термокарстовом озере Щучье в Северо-Восточной Сибири.

**Ключевые слова:** метан, вечная мерзлота, озера, численное моделирование.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Метан является важным парниковым газом в климатической системе, определяющим фотохимию атмосферы: по величине прямого потенциала глобального потепления он в 39 раз (в расчете на единицу концентрации и для периода 20 лет) превышает углекислый газ [1]. Единственным источником поступления метана в атмосферу является его эмиссия с подстилающей поверхности (преимущественно поверхности суши). Динамика концентрации метана в атмосфере уже учитывается в ряде современных климатических моделей (см., например, [2, 3]). Однако для того чтобы правильно моделировать цикл метана в атмосфере, необходимо рассчитывать его географически распределенную эмиссию с поверхности суши, чтобы затем использовать эту информацию в качестве граничных условий для моделей общей циркуляции и химии атмосферы. Вместе с тем даже если бы существовали надежные оценки эмиссии метана в настоящее время, ее прогноз на будущее нельзя было бы сделать, исходя только из данных наблюдений. Это связано с тем, что процес-

сы, приводящие к образованию метана и выделению его в атмосферу, сложным и нелинейным образом зависят от температуры сред, в которых метан производится (почва) и через которые переносится (почва или водоем), от влажности почвы, количества и качества доступной для разложения органики и т.д. Это означает, что общее изменение эмиссии метана в атмосферу в будущем нельзя спрогнозировать, имея лишь прогноз среднего глобального или даже регионального изменения температуры воздуха и других климатических характеристик.

Для того чтобы получить оценку будущих значений потока метана с поверхности суши в атмосферу, необходимы математические модели, которые в каждой точке Земного шара связывали бы физические и биохимические процессы, приводящие к образованию потока метана через поверхность почвы или водоема, с климатическими и биогеохимическими характеристиками в этой точке. Особое значение при этом имеют процессы, происходящие в зоне вечной мерзлоты. Необходимо отметить, что модели производства, переноса и эмиссии метана с

поверхности болот (в том числе в зоне вечной мерзлоты) разрабатываются в последние 20–30 лет, и ряд из них обстоятельно калиброван с привлечением данных наблюдений. В то же время математическому моделированию эмиссии метана с озер уделялось значительно меньшее внимание, и авторам настоящей статьи, в частности, неизвестны параметризации этого процесса, используемые в климатических моделях. Однако данные наблюдений, полученные в последние годы, свидетельствуют о важности этого источника метана в климатической системе. В связи с этим целью данной работы является создание одномерной модели переноса метана через толщу водоема, сопряженной с моделью теплового переноса и биохимической моделью цикла метана (производства, окисления и переноса) в донных отложениях и нижележащем мерзлом грунте, пригодной для использования в климатических моделях.

Статья структурирована следующим образом. В разделе 2 приведен краткий обзор натуральных данных о потоке метана с болот и озер в зоне вечной мерзлоты и дан анализ существующих методов расчета эмиссии метана. В разделе 3 приведено описание термогидродинамической модели водоема и модифицированной модели производства и переноса метана в грунте, окисления и переноса метана в толще воды. В качестве основы для последней взята модель [4] как одна из наиболее часто используемых и проверенных на данных наблюдений моделей. В разделе 4 представлены результаты численных экспериментов и калибровки модели с привлечением доступных натуральных данных. В заключении приведены основные выводы работы.

## 2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭМИССИИ МЕТАНА С БОЛОТНО-ОЗЕРНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Авторами статьи обобщен материал работ [5–10], в которых, в свою очередь, использованы данные 16 публикаций, посвященных оценке глобальных источников метана. Естественными источниками являются тропические болота и торфяные болота северных широт, термиты, жвачные животные, вулканы и гидротермальные источники, океаны и пресноводные озера (в частности, открытая в последние годы эмиссия со дна термокарстовых озер в зоне вечной мерзлоты Восточной Сибири, Канады и Аляски [11]), кроме того, в настоящее время в литературе обсуждается возможность образования метана растениями в аэробных условиях. По современным представлениям основным природным источником метана являются болота (113 Мт  $\text{CH}_4$ /год из 530 Мт  $\text{CH}_4$ /год суммарного поступления этого газа в атмосферу [5–10]). Хотя значительную долю в глобальной эмиссии болот составляют тропические регионы, тем не менее болота северных широт представляют особый интерес,

поскольку именно в высоких широтах ожидаются и уже происходят наиболее выраженные изменения климата и связанные с ними изменения в площади распространения болот и их углеродном балансе.

В то время как существует множество натуральных данных об эмиссии метана болотами (например, в Западной Сибири [12–15]), экспериментальную изученность метановых процессов в озерах следует признать менее удовлетворительной. Измерениям эмиссии метана с поверхности внутриболотных озер посвящено сравнительно небольшое число работ [16–23]. В частности, в статье [19] приведены оценки потока метана с открытой поверхности воды 42 озер в районе дельты рек Юкон и Кускоквим (Аляска). Для небольших озер величина этого потока составила в среднем  $77 \pm 10 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ , для больших  $3.8 \pm 0.8 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ . По самолетным измерениям в этом же районе среднее значение удельного потока составило  $57 \pm 6 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  [20]. Авторами работы [21] для трех небольших внутриболотных озер средней тайги и лесотундры в Западной Сибири были получены средние значения удельных потоков от 1.1 до  $120 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ , а авторами статьи [22] для внутриболотных озер лесотундры, северной тайги и подтайги Западной Сибири величины 17.6, 44.8 и  $169.7 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  соответственно. Все эти приведенные значения сравнимы по порядку с величиной потока метана с болот, причем часто именно потоки метана с внутриболотных озер являются максимальными среди всех элементов болотного ландшафта.

Существуют, по крайней мере, три механизма выноса  $\text{CH}_4$  из почвы в атмосферу: диффузия в растворенном виде (в водоеме – турбулентная), пузырьковый перенос и транспортный механизм, осуществляемый растениями [23]. Пузырьки на 6–24% [21] или даже на 60% [17] могут состоять из метана, что свидетельствует о важности этого механизма транспорта. В работе [24] приведены результаты измерений величины пузырькового потока  $\text{CH}_4$  из 16 северных озер различных типов (в том числе термокарстовых); экстраполяция этих данных на все северные озера дала для потока метана значение около  $24.2 \pm 10.5 \text{ Мт/год}$ , тогда как в более ранней работе [9] для зоны тундры приводится интервал неопределенности потока  $\text{CH}_4$  от 1 до 5 Мт/год – без учета пузырькового потока из так называемых точечных источников (сильных и узких струй пузырьков). В связи с этим следует отметить, что часто используемый для измерения потока метана на поверхности озера метод плавающих камер обладает принципиальным недостатком: вероятность того, что камера измерит поток на точечных источниках, очень мала, поскольку эти источники занимают очень небольшую долю площади зеркала водоема. Поэтому полученные ранее оценки эмиссии метана из озер этим методом могут оказаться существенно заниженными.

Роль озер в формировании потока метана с подстилающей поверхности в атмосферу определяется также и тем, что, в отличие от болот, они являются существенными источниками  $\text{CH}_4$  в течение почти всего года. В холодное время года деятельный слой болот промерзает и, следовательно, генерация метана там почти прекращается [25]. В то же время в слое оттаивания (“талике”) под водоемами генерация метана продолжается круглый год (по данным работы [11] до 47% годового потока метана приходится на период ледостава). Принимая во внимание этот эффект, а также широкую распространенность озер в зоне вечной мерзлоты, представляется важным учитывать вклад озер в региональных эмпирических оценках потоков метана, а также развивать специфические модели эмиссии метана с озер, в частности, для последующего их включения в климатические модели.

В настоящее время существует иерархия моделей, разработанных для расчета эмиссии метана с поверхности почвы и болот, которые различаются между собой сложностью и подробностью описания процессов в зависимости от задач, которые они призваны решать. Однако для переноса метана в водоемах, насколько известно авторам, аналогичные модели практически не разработаны.

Что касается почвы, то наиболее простыми являются модели, основанные на эмпирических зависимостях эмиссии метана от каких-либо параметров почвы — например, температуры на определенной глубине, уровня грунтовых вод и/или количества осадков (см., например, [26, 27]). Такие эмпирические зависимости строятся для конкретных территорий в конкретный сезон и используются для моделирования короткопериодных изменений потока метана на данной территории. Известно, однако, что большая часть изменчивости потока метана, если рассматривать большие территории и большие времена, не может быть описана с привлечением только этих параметров [27]. По-видимому, не существует единой регрессионной зависимости, пригодной для использования во всех географических регионах Земли и для любого сезона.

Более универсальной является методология, связанная с использованием одномерных по вертикали моделей, позволяющая вычислить интенсивность производства и окисления метана в почве по заданному уровню грунтовых вод, вертикальному профилю температуры и некоторым другим параметрам, характеризующим органическое вещество почвы [4]. Биологические процессы в этих моделях представлены химическими реакциями, управляемыми кинетикой Михаэлиса–Ментен [28]. В частности, в модели [29] в явном виде описывается динамика различных типов подземного углерода, но процессы физического переноса метана явно не разрешаются (эмиссия метана вычисляется как разность между интегральными производством и

окислением). Существуют, однако, модели [4, 30], разработанные для более общего случая, в которых процессы вертикального переноса метана уже описываются явно. При этом в [30] учитывается лимитирующее влияние ограниченного содержания кислорода в почве на окисление метана в аэробных условиях, однако не принимается во внимание пузырьковый перенос метана. Эта модель была создана для расчета эмиссии метана с поверхности торфяных болот, где, по мнению ее авторов, перенос метана растениями играет основную роль. В работе [4] пренебрегается лимитирующим влиянием кислорода, но учитываются, кроме переноса растениями, также пузырьковый и диффузионный механизмы. Модель [31] представляет собой соединение алгоритмов модели [4], описывающих производство, окисление и перенос метана, с алгоритмами, заимствованными из модели [32] и описывающими лимитирующее влияние некоторых дополнительных факторов. Все эти модели также нельзя считать универсальными, поскольку они содержат некоторое число параметров, в которых “спрятана” информация о химическом составе почвы и растительных остатков и значения которых определяются при калибровке моделей по данным наблюдений.

На другом “полюсе” по сложности находятся модели, подробно описывающие всю кинетику образования метана из исходного органического вещества и динамику микробных популяций. Они с успехом применяются в моделировании процессов в биореакторах [33], и в последние десятилетия были предприняты попытки адаптации таких моделей к наземным экосистемам [34]. Однако такого рода модели содержат большое количество параметров-констант (например, 37 в модели [34]), часть из которых характеризует биохимические реакции в целом, а другие являются калибровочными и зависят от свойств конкретной территории. Все эти параметры известны с ограниченной точностью, а свойства почвы к тому же обладают высокой пространственной неоднородностью, что приводит к увеличению неопределенности получаемых результатов и, возможно, к потере преимуществ этого типа моделей при глобальном моделировании климата. При этом авторами [34] в результате экспериментов по чувствительности их модели к возмущению различных ее параметров (в условиях болот Флориды) сделан вывод о том, что наибольшее влияние на эмиссию метана оказывают количество доступной органики, интенсивность диффузии кислорода и интенсивность окисления метана, а изменчивостью параметров, характеризующих другие процессы, можно пренебречь. Поэтому вероятно, что модель по сложности рангом ниже, но учитывающая эти наиболее важные процессы, будет воспроизводить наблюдаемые значения эмиссии метана с достаточно хорошей точностью.

Таким образом, оптимальным в настоящее время подходом к расчету эмиссии метана для задачи моделирования глобальных климатических изменений представляется построение такой модели, которая не будет слишком сложной и подробной и которую практически невозможно точно обеспечить входными параметрами, но и не будет слишком простой и эмпирической, в которой явно не учитываются многие физические и биохимические процессы и которая была бы пригодна лишь для конкретной территории. В связи с этим в настоящей работе при построении модели генерации, переноса и эмиссии метана в водоемах зоны вечной мерзлоты авторы стремились достигнуть “разумного” компромисса между универсальностью (сложностью) модели и минимизацией количества неопределенных (калибровочных) параметров.

### 3. МОДЕЛЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ЦИКЛА МЕТАНА В СИСТЕМЕ “ГРУНТ–ВОДОЕМ”

В настоящей работе модель генерации, переноса и стока метана в системе “грунт–водоем” встроена в одномерную гидротермодинамическую модель водоема [35, 36]. Термическое состояние водоема описывается на основе одномерного уравнения притока тепла с учетом турбулентного теплообмена и поглощения солнечной радиации

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k_T \frac{\partial T}{\partial \xi} + S_\xi(T) - S_1(T) - \frac{1}{c_w \rho_{w0} h} \frac{\partial I}{\partial \xi}, \quad (1)$$

где для любой переменной  $x$

$$S_\xi(x) = \frac{\xi}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\partial x}{\partial \xi}, \quad S_1(x) = \frac{1}{h} B_s \frac{\partial x}{\partial \xi}. \quad (2)$$

В формулах приняты следующие обозначения:  $T$  – температура,  $t$  – время,  $h$  – глубина водоема,  $\xi = z/h$ , где  $z$  – вертикальная координата, направленная вдоль силы тяжести (вниз) и отсчитываемая от поверхности водоема,  $k_T$  – коэффициент теплопроводности, равный сумме молекулярного и турбулентного коэффициентов,  $c_w$  – теплоемкость воды,  $\rho_{w0} = 1000 \text{ кг/м}^3$  – средняя плотность пресной воды,  $I$  – поток солнечной радиации,  $B_s$  – водный баланс на границе с атмосферой (осадки минус испарение). В уравнении (1), в сравнении с его более традиционной формой, присутствуют слагаемые  $S_\xi$  и  $S_1$ , отражающие переход к  $\xi$  – системе координат и движение верхней границы водоема при испарении и выпадении осадков соответственно. Распределение солнечной радиации по глубине задается экспоненциальной зависимостью. Турбулентный коэффициент теплопроводности вычисляется в рамках одномерной  $E$ - $\epsilon$  параметризации [37]. Результаты численных экспериментов с моделью по воспроизведению свободной конвекции в охлаждаемом сверху слое жидкости [38] и ин-

трузии турбулентного слоя в стратифицированную жидкость [39] продемонстрировали ее физическую адекватность и согласие с другими моделями [37].

В модели рассчитывается изменение толщины слоя льда во времени и распространение тепла в нем согласно уравнению, аналогичному (1), но с молекулярным коэффициентом теплопроводности. В случае, если лед покрыт снегом, то по модели, разработанной в Институте вычислительной математики РАН (ИВМ РАН) [40], вычисляются толщина снежного покрова, температура, плотность и содержание жидкой влаги в нем. Температура, влажность и содержание льда в грунте под водоемом описываются системой уравнений теплового переноса с учетом фазовых переходов влаги, реализованной в климатической модели ИВМ РАН [41] (полагая равным нулю содержание водяного пара). Адекватное описание теплового режима грунта имеет важное значение для точности расчета генерации метана, поскольку последняя зависит от температуры экспоненциально. Рассмотренная выше модель участвует в международном проекте сравнения моделей водоема LakeMIP (Lake Model Inter-comparison Project, [42]).

#### 3.1. Генерация, перенос и сток метана в донных отложениях и грунте под озером

Моделирование генерации, переноса и стока метана в донных отложениях и грунте под озером осуществляется на основе уравнения для концентрации метана  $C_{\text{CH}_4}$

$$\frac{\partial C_{\text{CH}_4}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_{\text{CH}_4,s} \frac{\partial C_{\text{CH}_4}}{\partial z} + P - E, \quad (3)$$

где  $P$  – генерация метана в ходе анаэробного разложения органики,  $E$  – сток метана за счет образования пузырьков. В отличие от аналогичных уравнений, применяемых в моделях образования, переноса и стока метана в болотных экосистемах (например, [43]), в уравнении (3) опущены слагаемые, отвечающие за окисление метана и поглощение его корнями растительности. Пренебрежение окислением вызвано тем, что в донных отложениях водоема с глубинами в несколько метров содержание кислорода, как правило, невелико. Кроме того, поскольку в олиготрофных термокарстовых озерах растительность развита слабо, то в первом приближении ее эффектом также можно пренебречь. Коэффициент молекулярной диффузии растворенного метана  $k_{\text{CH}_4,s}$  вычисляется с учетом соотношения жидкой и газовой фазы в порах грунта, а также температуры [44]. На нижней границе слоя грунта поток метана полагается равным нулю. Принимается также условие сопряжения для переноса метана на границе “донные отложения–вода”, т.е. равенство потоков метана и концентрации метана по обе стороны от границы раздела.

Образование пузырьков происходит при превышении концентрацией метана критического значения  $C_{CH_4,cr}$ , определяемого атмосферным давлением  $p_a$ , гидростатическим давлением столба воды, зависящем от толщины водоема  $h$ , концентрацией азота  $C_{N_2}$  и пористостью  $\Pi$ :

$$E = \max\{0, c_e[C_{CH_4} - \alpha_e C_{CH_4,cr}(p_a, h, C_{N_2}, \Pi)]\}. \quad (4)$$

Здесь  $c_e = 2.78 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  — константа, определяющая скорость образования пузырьков [44], а  $\alpha_e$  — “относительная” концентрация, при которой начинается образование пузырьков (следует [43], принята равной 0.4). Под критической концентрацией понимается та концентрация, при которой сумма давлений газов, находящихся в равновесии с раствором почвенной влаги по закону Генри, равна давлению окружающей среды, т.е. сумме атмосферного давления, гидростатического давления столба воды, а также поправок к давлению, вызванных действием капиллярных и осмотических сил в почве [45]. Поскольку константы Генри, используемые в настоящей модели, измерены для случая плоской поверхности воды, а поверхность пузырьков сферическая, то коэффициент  $\alpha_e$  призван учесть также эффект сферичности (равновесное давление газа над вогнутой поверхностью пузырька больше, чем над плоской поверхностью раствора), наряду с указанными поправками к давлению. Формула для расчета  $C_{CH_4,cr}$  приведена в Приложении А.

В модели считается, что все пузырьки, образовавшиеся в слое грунта и донных отложений, мгновенно достигают поверхности водоема без изменения их газового состава (это предположение обосновано в п. 3.2). Тогда пузырьковый поток метана на поверхности открытого водоема  $F_a$  можно представить в виде

$$F_a = \int_0^{h_s} Edz,$$

где  $h_s$  — толщина рассматриваемого под водоемом слоя грунта. Зимой, во время ледостава, часть пузырьков задерживается льдом, вмораживаясь в него в виде характерных скоплений. Поток пузырьков  $F_{a,i}$ , задерживаемый льдом, выражается следующим образом

$$F_{a,i} = k_{tr} \int_0^{h_s} Edz,$$

где  $k_{tr}$  — константа (обоснование ее значения приводится в разделе 4). В модели принято, что количество метана, накопленное за зиму в ледяном покрове, “мгновенно” высвобождается в атмосферу при исчезновении слоя льда.

Слагаемое  $P$ , ответственное за генерацию метана, должно отражать эффекты разложения двух видов органики. Первый вид — это “молодая” органика, которая оседает на дно водоема в ходе функционирования его экосистемы. В этом случае можно принять, что соответствующая часть генерации метана пропорциональна продуктивности экосистемы. Кроме того, молодая органика поступает на дно в процессе абразии берегов под воздействием ветрового волнения. Формулы для генерации метана в ходе разложения молодой органики развиты в ряде работ, посвященных болотным экосистемам (например, [44]), и в настоящей модели используется одна из таких формул (см. ниже уравнение (6)). Второй вид органики — это “старая” органика, которая “законсервирована” в вечной мерзлоте и попадает в область положительных температур при заглуплении талика [11]. Экспериментально “старая” и “молодая” органика различаются по отношению количества изотопа углерода  $^{13}\text{C}$  к  $^{14}\text{C}$ .

В связи со сказанным выше можно считать, что

$$P = P_{new} + P_{old}, \quad (5)$$

причем генерация метана за счет разложения молодой органики  $P_{new}$  определяется формулой

$$P_{new} = P_{new,0} e^{-\alpha_{new} z_s} q_0^{T/T_0} H(T), \quad (6)$$

где температура  $T$  выражена в градусах Цельсия,  $H(T)$  — функция Хэвисайда,  $\alpha_{new}$  — параметр, определяющий скорость убывания генерации метана с глубиной (выбор его значения поясняется в разделе 4),  $T_0$  и  $q_0$  — константы, положенные, согласно [44], равными  $10^\circ\text{C}$  и 6 единицам соответственно,  $P_{new,0}$  — калибруемый множитель, выбор его значения излагается в разделе 4,  $z_s$  — глубина, отсчитываемая от дна водоема.

Для вывода формулы, описывающей скорость генерации метана при разложении старой органики  $P_{old}$ , целесообразно воспользоваться следующими соображениями. Естественно предположить, что

$$P_{old} = P_{old,0} q_0^{T/T_0} H(T), \quad (7)$$

где “константа”  $P_{old,0}$  пропорциональна  $\rho_{old}$  — плотности старой органики ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), доступной для разложения. В ходе разложения эта плотность уменьшается, причем скорость разложения можно описать уравнением Михаэлиса–Ментен:

$$\frac{d\rho_{old}}{dt} = -\frac{V\rho_{old}}{\alpha + \rho_{old}}, \quad (8)$$

где введено два новых параметра —  $V$ , определяющий скорость разложения первого порядка при  $\rho_{old} \rightarrow \infty$ , и константа полунасыщения  $\alpha$  (значения параметров приводятся в разделе 4). Используя (7) и (8), можно получить (Приложение Б) следующее

выражение для скорости генерации метана при разложении старой органики:

$$P_{old} = P_{old,0}^* \rho_{old,0} \left[ 2 + \lambda_p - \sqrt{(1 + \lambda_p)^2 + 2\gamma_p C_t^{-2} (h_t^2 - z_s^2)} \right] q_0^{T/T_0} H(T), \quad (9)$$

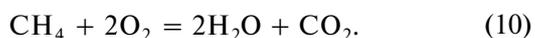
где  $\lambda_p = \rho_{old,0} \alpha^{-1}$ ,  $\gamma_p = V \alpha^{-1}$ ,  $h_t$  – толщина талика,  $\rho_{old,0}$  – плотность старой органики в момент начала ее разложения, равная плотности органики под таликом.

Параметры  $P_{new,0}$  и  $P_{old,0}^*$  в настоящей работе считаются калибровочными, и их значения приводятся в разделе 4 при описании результатов проверки и калибровки модели.

### 3.2. Перенос и сток растворенного метана в водной толще

Перенос метана в водной толще осуществляется в виде пузырьков, поднимающихся со дна водоема, и в растворенном виде. При подъеме пузырьков происходит газообмен на границе жидкой и газовой фазы. Вследствие газообмена газовый состав пузырьков меняется, так что пузырьковый поток метана на поверхности водоема отличается от пузырькового потока на дне. Чтобы оценить величину этого эффекта, в настоящей работе использована модель газового состава пузырьков, предложенная в статье [46] и реализованная в виде программного приложения SiBu-GUI [47]. Согласно расчетам этой модели, при температуре воды 4–10°C, глубинах водоема 3–10 м (характерные значения температуры и глубины для термокарстовых озер) пузырьки, образующиеся на дне и состоящие только из метана, при достижении поверхности водоема состоят из метана не менее, чем на 89%. Таким образом, в первом приближении изменением газового состава пузырьков можно пренебречь. Поднимающиеся пузырьки образуют также циркуляцию воды по структуре аналогичную термикам, называемую “пузырьковой конвекцией”. Эта циркуляция приводит к дополнительному перемешиванию водной толщи, что может быть особенно важно в зимних условиях, когда в отсутствие пузырьков турбулентное перемешивание было бы пренебрежительно мало. Однако в настоящей модели эффект пузырьковой конвекции опущен, поскольку он, по-видимому, не производит существенного влияния на процессы генерации метана.

Окисление метана производится в присутствии бактерий-метанотрофов и в первом приближении может быть описано следующим стехиометрическим соотношением



Кинетика окисления метана традиционно рассчитывается на основе уравнения Михаэлиса–Ментен [48], которое в некоторых моделях метановых процессов записывается в предположении очень высокой (формально бесконечной) концентрации кислорода. В случае водоема целесообразно отказаться от этого предположения, поскольку в придонных слоях водоемов (особенно в зимнее время года) часто наблюдаются очень низкие концентрации кислорода. В связи с этим полное уравнение для концентрации метана в водной толще можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial C_{\text{CH}_4}}{\partial t} = \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k_{\text{CH}_4} \frac{\partial C_{\text{CH}_4}}{\partial \xi} + S_\xi(C_{\text{CH}_4}) - S_1(C_{\text{CH}_4}) - V_{\text{oxid}}(T) \frac{C_{\text{O}_2}}{k_{\text{MM},\text{O}_2} + C_{\text{O}_2}} \frac{C_{\text{CH}_4}}{k_{\text{MM},\text{CH}_4} + C_{\text{CH}_4}}. \quad (11)$$

Здесь в правой части появилось слагаемое Михаэлиса–Ментен с константами полунасыщения в знаменателе и скоростью  $V_{\text{oxid}}(T)$ , зависящей от температуры в соответствии с уравнением Аррениуса. Содержание растворенного кислорода  $C_{\text{O}_2}$  рассматривается только в водной толще, поскольку концентрацию вблизи дна, в донных отложениях и нижележащем грунте можно считать близкой к нулю.

На настоящий момент предложены различные модели динамики кислорода в водоемах (см., например, [49]), в которых учтены такие процессы, как турбулентная диффузия кислорода, фотосинтез, сток кислорода на разложение органики и др. В настоящей модели источник кислорода за счет фотосинтеза опущен, поскольку, согласно данным наблюдений [50], в термокарстовых озерах преобладает кислая среда и планктон, обеспечивающий фотосинтез, практически не развивается. Это упрощение позволяет исключить из модели ряд эмпирических констант, обычно входящих в параметризацию процесса фотосинтеза. Кроме того, олиготрофность термокарстовых озер позволяет пренебречь в модели затратами кислорода на разложение отмершей органики. С учетом этих упрощений уравнение для концентрации кислорода принимает вид:

$$\frac{\partial C_{\text{O}_2}}{\partial t} = \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k_{\text{O}_2} \frac{\partial C_{\text{O}_2}}{\partial \xi} + S_\xi(C_{\text{O}_2}) - S_1(C_{\text{O}_2}) - 2V_{\text{oxid}}(T) \frac{C_{\text{O}_2}}{k_{\text{MM},\text{O}_2} + C_{\text{O}_2}} \frac{C_{\text{CH}_4}}{k_{\text{MM},\text{CH}_4} + C_{\text{CH}_4}}. \quad (12)$$

Уравнение переноса углекислого газа с точностью до обозначений повторяет уравнение (12), но с положительным знаком в последнем слагаемом правой части.

Для коэффициентов турбулентной диффузии растворенных газов полагается равенство

$k_{CH_4} = k_{O_2} = k_{CO_2} = k_T$ . Потоки растворенного кислорода и углекислого газа на дне водоема считаются равными нулю. На границе водоема с атмосферой задаются потоки рассматриваемых газов, зависящие от градиента их концентрации в приводном слое воздуха и скорости ветра [51].

#### 4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ

Измерения потоков метана над водоемами в зоне вечной мерзлоты в настоящее время носят эпизодический характер, что не позволяет провести калибровку и проверку предлагаемой модели на достаточно большом количестве объектов, представляющих различные климатические условия. Насколько известно авторам, наиболее длинный ряд наблюдений высокого временного разрешения был проведен К. Вальтер и соавторами [11] на двух термокарстовых озерах в Северо-Восточной Сибири. Данные измерений пузырькового потока метана на одном из этих озер (оз. Щучье) выбраны в настоящем исследовании для калибровки и валидации модели. Эти данные покрывают период с 28.04.2003 г. по 30.06.2004 г. с временным разрешением 1 час, однако в них имеются значительные пропуски, особенно в зимнее время. Измерения проводились в разных частях озера, отличающихся глубиной и интенсивностью термокарстового процесса. Поскольку метеорологические наблюдения в окрестности озера не проводились (за исключением измерений атмосферного давления), то в качестве атмосферного “форсинга” для модели были использованы временные ряды основных метеорологических величин в приземном слое воздуха, построенные по данным реанализа ERA-Interim (<http://www.ecmwf.int>). Потоки суммарной солнечной радиации и встречного атмосферного излучения были рассчитаны по полумпирическим формулам [54]. Глубина водоема в модели была задана равной 8 м, что можно считать оценкой средней глубины (максимальная глубина – 11 м).

Очевидно, что в рамках одномерной по вертикали модели невозможно воспроизвести горизонтальную изменчивость потоков метана в пределах озера. Поэтому задачей калибровки предложенной модели было достижение близости рассчитанного среднего по поверхности озера суммарного за год количества метана, выделяемого в атмосферу, к величине, оцененной по данным наблюдений.

Переходя к выбору параметров модели, отметим, что, используя данные измерений на оз. Щучье, можно оценить, что зимний поток метана через незамерзающие отверстия в ледяном покрове составляет ~0.1 от величины суммарной зимней эмиссии. Целесообразно поэтому выбрать константу  $k_{r,r}$  (долю пузырьков, образующихся в талике под водоемом преимущественно из метана и задерживаемых

в зимнее время ледовым покровом) равной 0.9. Константа полунасыщения  $\alpha = 0.3 \text{ кг/м}^3$  из уравнения Михаэлиса–Ментен для разложения старой органики выбрана в соответствии с [53], а параметр  $V$  положен равным  $2 \times 10^{-3} \text{ кг/(м}^3 \text{ год)}$  в соответствии с оценкой по данным [54]. Плотность органики под таликом  $\rho_{old,0}$  считалась равной  $18 \text{ кг/м}^3$ , что является характерным значением для зоны вечной мерзлоты. Величина  $\alpha_{new}$  принята равной  $3 \text{ м}^{-1}$ , в отличие от  $5 \text{ м}^{-1}$  в модели [44]. Меньшее значение скорости убывания генерации метана с глубиной должно учесть процесс поступления органики от разрушающихся берегов, которая, накапливаясь на дне, по видимому, образует близкую к однородной по вертикали среду с активной генерацией метана.

Неопределенными (калибруемыми) параметрами в модели являются  $P_{new,0}$  и  $P_{old,0}^*$ . Величины  $P_{new,0}$  и  $P_{old,0}^*$  подбирались таким образом, чтобы функция  $\Delta F^2 \equiv (F_a^w - F_{a,m}^w)^2 + (F_a^s - F_{a,m}^s)^2$  ( $\Delta F > 0$ ) достигала минимума. Здесь верхние индексы  $w$  и  $s$  обозначают суммарный поток метана за период открытой воды и период ледостава соответственно, а нижний индекс  $m$  – измеренные величины. Когда эта функция равна нулю, модель точно воспроизводит годовой поток метана и его распределение между теплым и холодным сезонами. Зависимость ошибки от калибруемых параметров  $\Delta F(P_{new,0}, P_{old,0}^*)$  изображена на рис. 1. Она построена по данным 196 численных экспериментов (196 пар значений параметров) с использованием технологии параллельного программирования MPI. Как видно, по данным расчетов функция имеет единственный минимум, причем это подтверждается численными экспериментами в более широком диапазоне изменения параметров, чем диапазон, представленный на рисунке.

Сопоставление величин годовой и сезонной эмиссии метана (с 1 июня 2003 г. по 1 июня 2004 г.) на оз. Щучье по результатам моделирования и данным измерений при оптимальных по результатам калибровки значениях параметров  $P_{new,0} = 2.55 \times 10^{-8} \text{ моль/(м}^3 \text{ с)}$  и  $P_{old,0}^* = 6.9 \times 10^{-11} \text{ моль/(кг с)}$  приведено в табл. 1.

Как видно из этой таблицы, калибровка позволила получить очень близкое соответствие рассчитанных и измеренных значений.

Данные натурных измерений потока метана на оз. Щучье из точечных источников (они представляют собой узкие сильные струи пузырьков) и фонового пузырькового потока представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Несмотря на значительные пропуски в наблюдениях в зимний период, видно, что выраженного годового хода пузырькового потока метана из точечных источников не наблюдается.

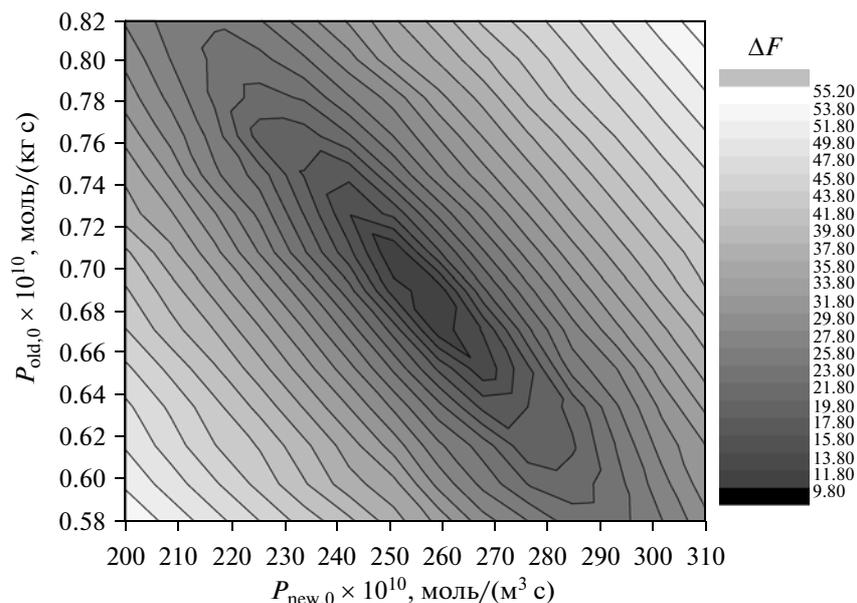


Рис. 1. Мера ошибки модельной эмиссии метана  $\Delta F$  в зависимости от параметров  $P_{new,0}$  и  $P_{old,0}^*$ .

Это естественно, поскольку эти источники (в особенности, интенсивные источники, “hotspots”) формируются на значительных глубинах под дном водоема, где температура меняется в течение года незначительно. В то же время фоновый пузырьковый поток обнаруживает максимум в летнее время (рис. 3), так же как и суммарный пузырьковый поток [11]. Модель воспроизводит этот максимум (рис. 4), хотя и со сдвигом по времени.

С точки зрения проверки физической адекватности модели интерес также представляет соотношение количества “молодого” и “старого” метана в общем потоке этого газа из водоема в атмосферу. Поскольку в модели рассчитывается только интегральный поток метана, то для оценки эмиссии упомянутых типов этого газа естественно воспользоваться величинами суммарной продукции этих

видов метана  $\tilde{P}_{new} = \int_0^{T_{hs}} \int_0 P_{new} dz dt$  и  $\tilde{P}_{old} = \int_0^{T_{hs}} \int_0 P_{old} dz dt$ , где  $T$  в данном случае – период време-

ни, соответствующий открытой воде или ледоставу (за такие длительные периоды интегральная генерация почти равна интегральной эмиссии). В табл. 2 приводится сопоставление этих величин с данными наблюдений.

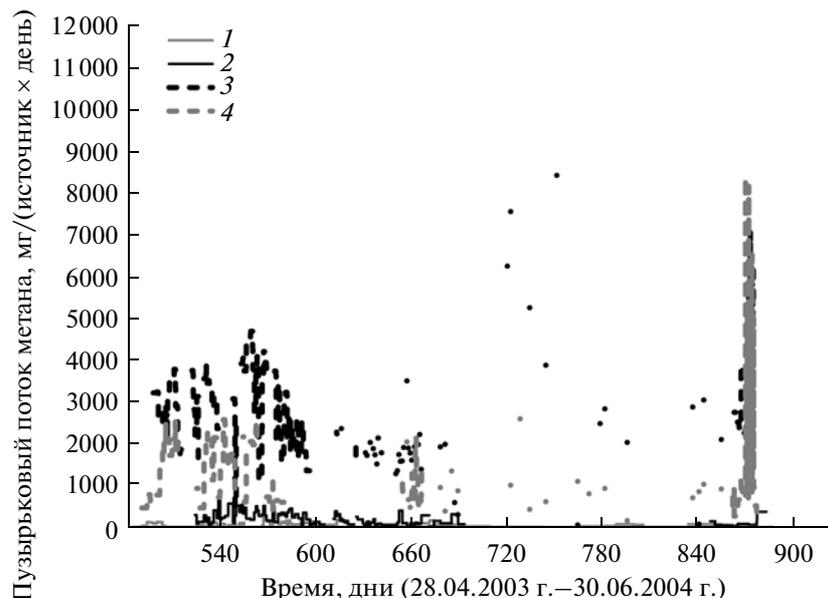
Приведенные в табл. 2 величины демонстрируют качественное согласие. Резкое повышение доли молодого метана в летней эмиссии объясняется известными закономерностями распространения тепла в грунте, в данном случае, в талике (рис. 5). Как видно, летом максимум температуры приходится на дно водоема, поэтому там происходит интенсивный метаногенез, который потребляет молодую органику, поступающую на дно в ходе функционирования экосистемы и абразии берегов. Зимой максимум температуры смещается на глубину несколько метров под дном водоема, где метанообразование происходит на основе разложения уже более старой органики.

Известно [55], что значительная доля временной изменчивости генерации метана в болотах вызвана колебаниями атмосферного давления. Представляется важным, чтобы модель воспроизводила и этот

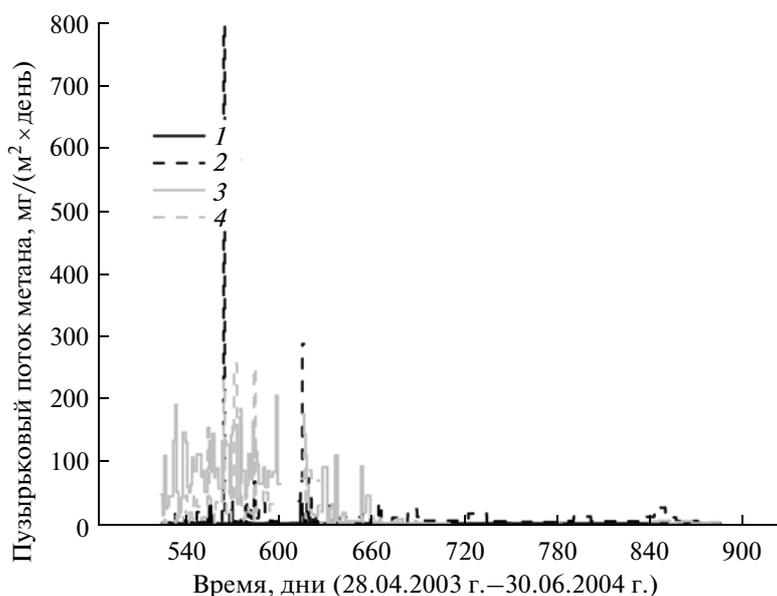
Таблица 1. Характеристики годовой эмиссии метана в атмосферу на оз. Щучье

Источник данных	Годовая эмиссия метана, мг/(м <sup>2</sup> год)	Доля эмиссии в период открытой воды, %	Доля эмиссии в период ледостава, %
Наблюдения [11] <sup>1</sup>	22658 <sup>1</sup>	54	46
Модель	22588	54	46

Примечание. <sup>1</sup> К сожалению, авторы статьи [11] не приводят точность оценок сумм эмиссии метана по сезонам и в целом за год, поэтому пятый знак в представлении чисел табл. 1 не следует ассоциировать с точностью оценки этих величин.



**Рис. 2.** Пузырьковый поток метана из точечных источников (“point-source”) и интенсивных источников (“hotspots”) в четырех частях озера Щучье (Северо-Восточная Сибирь) по данным измерений [11] (28 апреля 2003 г.–30 июня 2004 г.). 1 – Граница термокарста в глубокой части озера (глубина 7.4 м) – точечный источник; 2 – граница термокарста на мелководье (глубина 1.75 м) – точечный источник; 3 – термокарст (глубина 2.25 м) – интенсивный источник; 4 – термокарст в глубокой части озера (глубина 4.75 м) – интенсивный источник.



**Рис. 3.** Фоновый пузырьковый поток метана в четырех частях озера Щучье (Северо-Восточная Сибирь) по данным измерений [11] (28 апреля 2003 г.–30 июня 2004 г.). 1 – Центр (глубина 8 м); 2 – область термокарста (глубина 1.75 м); 3 – граница термокарста (глубина 1.5 м); 4 – граница области без термокарста (глубина 1.4 м).

эффект. Численный эксперимент с описываемой моделью при фиксированном атмосферном давлении 1000 гПа дал результат, изображенный на рис. 4. Как видно, при постоянном давлении изменчивость потока метана становится значительно меньше. Очевидно, колебания атмосферного давления

вызывают колебания критической концентрации метана согласно уравнению (4), что, в свою очередь, вызывает “всплески” пузырьковой эмиссии метана.

В заключение сделаем несколько замечаний по результатам калибровки модели. Очевидно, что ме-

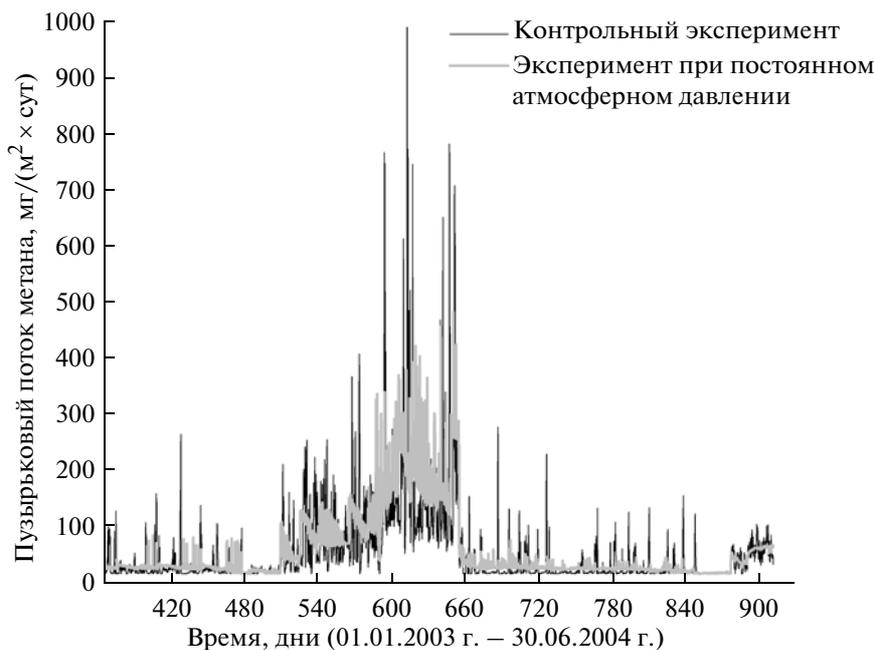


Рис. 4. Средний по площади пузырьковый поток метана на озере Щучье по результатам моделирования (1 января 2003 г.–30 июня 2004 г.).

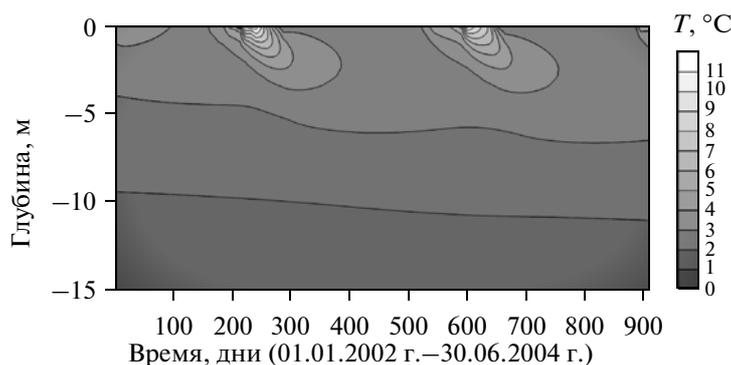


Рис. 5. Термоизоплеты в талике под озером Щучье по результатам моделирования (1 января 2002 г.–30 июня 2004 г.).

ра ошибки модели  $\Delta F$  зависит от множества параметров, которое можно разбить на три группы

- калибровочные параметры ( $P_{new,0}$  и  $P_{old,0}^*$ );
- физические параметры, значения которых для данного озера неизвестны или известны с большой

**Таблица 2.** Результаты моделирования и данные наблюдений по соотношению молодого и старого метана в эмиссии метана на оз. Щучье

Источник данных	Период открытой воды	Период ледостава
Доля молодого метана в эмиссии ( $^{14}\text{CH}_4$ ) по данным наблюдений [11], %	47	6
Доля молодого метана в суммарной генерации метана $\bar{P}_{new}/(\bar{P}_{new} + \bar{P}_{old})$ , %	61	32

погрешностью. Среди них – средняя глубина озера и коэффициент ослабления солнечной радиации в воде, от которых сильно зависит температура на дне водоема и ниже, а значит, и скорость генерации метана;

– граничные условия для модели – временные ряды метеорологических величин, которые, как указано выше, в окрестностях озера не измеряются.

В то же время  $\Delta F$  формально минимизируется как функция только калибровочных параметров ( $P_{new,0}$  и  $P_{old,0}^*$ ). По этой причине если бы физические параметры и граничные условия были бы известны с лучшей точностью, оптимальные значения  $P_{new,0}$  и  $P_{old,0}^*$  приняли бы, вообще говоря, другие значения. В связи с этим полученные здесь значения  $P_{new,0}$  и  $P_{old,0}^*$  могут рассматриваться как приближенные, и в

дальнейшем следует проверить их на других озерах, и, возможно, на том же оз. Щучье при условии лучшего информационного обеспечения по названным входным для модели данным.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена численная одномерная модель генерации, переноса и стока метана в системе “водоем—грунт”. На основе уравнения диффузии с источниками модель воспроизводит процессы генерации метана в грунте, его молекулярную диффузию, и сток за счет образования пузырьков. Основная особенность модели в сравнении с аналогичными моделями для болотных систем заключается в представлении генерации метана как суммы генерации за счет разложения молодой органики и старой органики. Поступление молодой органики обусловлено продуктивностью водоема, а также абразией берегов, а старая органика попадает в зону положительной температуры (и, таким образом, становится доступной для разложения) при заглублинии талика. Перенос растворенного метана в водной толще описывается на основе уравнения турбулентной диффузии со стоком, отвечающим за окисление метана кислородом. Данная модель включена в одномерную гидротермодинамическую модель водоема [35].

Модель гидротермодинамики водоема с блоком генерации, переноса и стока метана проверена и калибрована с привлечением данных реанализа ERA-Interim и данных наблюдений [11] потока метана на оз. Щучье (2003–2004 гг.). После калибровки параметров получено хорошее согласие результатов моделирования с натурными данными в терминах годовой эмиссии метана в атмосферу, распределения эмиссии между периодом открытой воды и ледостава, а также отношения количества метана, образующегося в результате разложения молодой и старой органики. Кроме того, модель качественно верно воспроизвела известный эффект колебаний атмосферного давления на временную изменчивость эмиссии метана [55]. Авторы рассчитывают, что в будущем при появлении надежных метеорологических данных будет проведено сопоставление натуральных и модельных временных рядов эмиссии метана. Также планируется включить разработанную модель в качестве одного из блоков в схему деятельного слоя суши климатической модели.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты №№ 09-05-00379-а и 09-05-13562-офи\_ц) и грантом Президента России № МК-5218.2010.5 для поддержки молодых российских ученых. Калибровка модели эмиссии метана производилась на суперкомпьютерах СКИФ-МГУ “Чебышев” и “Ломоносов”.

Авторы статьи выражают благодарность С.А. Зимову и К. Вальтер за консультации по данным наблюдений потока метана на оз. Щучье.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### КРИТИЧЕСКАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕТАНА В ПОЧВЕ

Критическую концентрацию метана в грунте можно рассчитать следующим образом. Пусть пузырьки, образующиеся в грунте, состоят только из метана и азота, так что должен выполняться баланс давления внутри пузырька и в окружающей среде

$$p_{\text{CH}_4} + p_{\text{N}_2} = p_a + p_l + p_*,$$

где  $p_a$  — атмосферное давление,  $p_l = \rho_{w0}gh$  — гидростатическое давление столба воды,  $p_{\text{CH}_4}$  и  $p_{\text{N}_2}$  — значения парциального давления для метана и азота соответственно, а  $p_*$  — слагаемое, отвечающее за прочие эффекты, в частности, распределение давления в грунте, вызванное капиллярными и осмотическими силами. Последнее слагаемое в описываемой модели принимается равным нулю, что частично компенсируется введением коэффициента  $\alpha_e$  в формуле (4). Полагая парциальные давления газов связанными с их концентрациями в растворе по закону Генри, можно записать следующее соотношение

$$C_{\text{CH}_4,cr}(p_a, h, C_{\text{N}_2}, \Pi) = \Pi K_{\text{H,CH}_4}(T) \times [p_a + \rho_{w0}gh - C_{\text{N}_2}/K_{\text{H,N}_2}(T)]. \quad (\text{A. 1})$$

Здесь  $\Pi$  — пористость грунта,  $C_{\text{N}_2}$  — концентрация азота в порах,  $K_{\text{H,CH}_4}$  и  $K_{\text{H,N}_2}$  — “константы” Генри, зависящие от температуры [56]. Концентрация азота в настоящей модели задается экспоненциальной зависимостью от глубины в грунте [57].

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### СКОРОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ МЕТАНА В ТАЛИКЕ ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ СТАРОЙ ОРГАНИКИ ПО КИНЕТИКЕ МИХАЭЛИСА—МЕНТЕН

В результате интегрирования уравнения (8) при начальном условии

$$\rho_{old} = \rho_{old,0} \text{ при } t = t_0,$$

можно получить следующую зависимость для изменения плотности старой органики со временем:

$$\alpha \ln \frac{\rho_{old}}{\rho_{old,0}} + \rho_{old} - \rho_{old,0} = -V(t - t_0). \quad (\text{B. 1})$$

Используя два первых члена разложения логарифма в ряд Тейлора

$$\ln x \approx (x-1) - \frac{1}{2}(x-1)^2, \quad x = \frac{\rho_{old}}{\rho_{old,0}}$$

и подставляя эту формулу в выражение (Б. 1), можно получить квадратное уравнение относительно  $\rho_{old}$ , из двух действительных решений которого убыванию плотности старой органики со временем соответствует следующий корень:

$$\rho_{old} = \rho_{old,0} \left[ 2 + \lambda_p - \sqrt{(1 + \lambda_p)^2 + 2\gamma_p C_t^{-2} (h_t^2 - z_s^2)} \right], \quad (\text{Б. 2})$$

где  $\lambda_p = \rho_{old,0} \alpha^{-1}$  и  $\gamma_p = V \alpha^{-1}$ . Соотношение (Б. 2) является приближенным, однако численное решение трансцендентного уравнения (Б. 1) методом хорд показало высокую степень его точности при значениях коэффициентов, отвечающих реальным условиям анаэробного разложения органики.

При выводе формулы (Б. 2) были использованы результаты работы [58], в которой на основании численного решения уравнения теплопроводности в грунте под водоемом показано, что заглубление талика с достаточной точностью соответствует классической формуле [59]

$$h_t = C_t \sqrt{t},$$

при этом  $z_s = C_t \sqrt{t_0}$  (момент начала разложения органики  $t_0$  — это время, когда глубина талика находилась на данной глубине  $z_s$ ). Из результатов работы [58] следует оценка  $C_t \approx 0.5$  м/год<sup>1/2</sup>. После подстановки (Б. 2) в формулу (7) получается следующее выражение для скорости генерации метана при разложении старой органики:

$$P_{old} = P_{old,0}^* \rho_{old,0} \left[ 2 + \lambda_p - \sqrt{(1 + \lambda_p)^2 + 2\gamma_p C_t^{-2} (h_t^2 - z_s^2)} \right] q_0^{T/T_0} H(T). \quad (\text{Б. 3})$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кароль И.Л. Оценки характеристик относительно вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 5–12.
2. Крупчатников В.Н., Крылова А.И. Моделирование эмиссии метана от природных избыточно увлажненных почв и гидрологии поверхности с учетом топографии // География и природные ресурсы: Спец. вып. 2004. С. 272–276.
3. Володин Е.М. Цикл метана в модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 163–170.
4. Walter B.P., Heimann M. A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate // Global Biogeochem. Cycles. 2000. V. 14. № 3. P. 745–765.
5. Beck L.L. A Global Methane Emissions Program for Landfills, Coal Mines, and Natural Gas Systems // Chemosphere. 1993. V. 26. № 1–4. P. 447–452.
6. Boeckx P., van Cleemput O. Flux estimates from soil methanogenesis and methanotrophy: landfills, rice paddies, natural wetlands and aerobic soils // Environmental Monitoring and Assessment. 1996. V. 42. № 1–2. P. 189–207.
7. Bogner J., Meadows M., Czepiel P. Fluxes of methane between landfills and the atmosphere: natural and engineered controls // Soil Use and Management. 1997. V. 13. Issue 0. P. 268–277.
8. Humer M., Lechner P. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills // Waste Management & Research. 1999. V. 17. P. 443–452.
9. Barber R.D., Ferry J.G. Methanogenesis // Encyclopedia of life sciences. 2001. Nature Publishing Group. Публикация доступна по адресу www.els.net
10. Harder S.L., Shindell D.T., Schmidt G.A. et al. A global climate model study of CH<sub>4</sub> emissions during the Holocene and glacial-interglacial transitions constrained by ice core data // Global Biogeochem. Cycles. 2007. V. 21. GB1011, doi: 10.1029/2005GB002680.
11. Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P. et al. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming // Nature. 2006. V. 443. № 7107. P. 71–75.
12. Паников Н.С., Титлянова А.А., Палеева М.В. и др. Эмиссия метана из болот юга Западной Сибири // ДАН. 1993. Т. 330. № 3. С. 388–390.
13. Кузин И.Л. Новейшая тектоника Ханты-Мансийского автономного округа // СПб.: Изд-во СПБ картфабрики ВСЕГЕИ, 2002. 86 с.
14. Казанцев В.С., Глаголев М.В. Эмиссия CH<sub>4</sub> в подзоне северной тайги: “стандартная модель” Аа3 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1 / Под ред. М.В. Глаголева, Е.Д. Лапшиной. Новосибирск: НГУ, 2008. С. 200–207.
15. Глаголев М.В., Клепцова И.Е. Эмиссия метана в лесотундре: к созданию “стандартной модели” (Аа2) для Западной Сибири // Вестн. ТГПУ. 2009. Вып. 3(81). С. 77–81.
16. Morrissey L.A., Livingston G.P. Methane emissions from Alaska arctic tundra: an assessment of local spatial variability // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № D15. P. 16661–16670.
17. Casper P., Chan O.C., Furtado A.L.S. et al. Methane in an acidic bog lake: The influence of peat in the catchment on the biogeochemistry of methane // Aquat. Sci. 2003. V. 65. № 1. P. 36–46.
18. Bergström I., Mäkelä S., Kankaala P. et al. Methane efflux from littoral vegetation stands of southern boreal lakes: An upscaled regional estimate // Atmos. Environ. 2007. V. 41. Issue 2. P. 339–351.
19. Bartlett K.B., Crill P.M., Sass R.L. et al. Methane emissions from tundra environments in the Yukon-Kuskokwim delta, Alaska // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № D15. P. 16645–16660.

20. *Fan S.M., Wofsy S.C., Bakwin P.S. et al.* Micrometeorological measurements of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> exchange between the atmosphere and subarctic tundra // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № D15. P. 16627–16643.
21. *Repo M.E., Huttunen J.T., Naumov A.V. et al.* Release of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from small wetland lakes in western Siberia // *Tellus.* 2007. V. 59B. Issue 5. P. 788–796.
22. *Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С. и др.* Эмиссия CH<sub>4</sub> из болотных ландшафтов подтайги Западной Сибири: к “стандартной модели” Ab4 // Восьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Мат-лы рос. конф. / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: “Аграф-Пресс”, 2009. С. 240–242.
23. *Bartlett K.B., Harriss R.C.* Review and assessment of methane emissions from wetlands // *Chemosphere.* 1993. V. 26. № 1–4. P. 261–320.
24. *Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. III.* Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2007. V. 365. P. 1657–1676.
25. *Panikov N., Dedysh S.* Cold season CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics // *Global Biogeochem. Cycles.* 2000. V. 14. № 4. P. 1095–1108.
26. *Dalva M., Moore T.R., Arp P. et al.* Methane and soil and plant community respiration from wetlands, Kejimikujik National Park, Nova Scotia: Measurements, predictions and climatic change // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № D3. P. 2955–2962.
27. *Frolking S., Crill P.* Climate controls on temporal variability of methane flux from a poor fen in southeastern New Hampshire: Measurement and modeling // *Global Biogeochem. Cycles.* 1994. V. 8. № 4. P. 299–327.
28. *Michaelis L., Menten M.L.* Die Kinetik der Invertinwirkung // *Biochem. Z.* 1913. Bd. 49. S. 333.
29. *Potter C., Bubier J., Crill P. et al.* Ecosystem modeling of methane and carbon dioxide fluxes for boreal forest sites // *Can. J. For. Res.* 2001. V. 31. P. 208–223.
30. *Arah J.R.M., Stephen K.D.* A model of the processes leading to methane emission from peatland // *Atmos. Environ.* 1998. V. 32. № 19. P. 3257–3264.
31. *Zhuang Q., Melillo J.M., Kicklighter D.W. et al.* Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model // *Global Biogeochem. Cycles.* 2004. V. 18. GB3010. 23 p.
32. *Cao M., Dent J.B., Heal O.W.* Modeling methane emissions from rice paddies // *Global Biogeochem. Cycles.* 1995. V. 9. № 2. P. 183–195.
33. *Vavilin V.A., Vasiliev V.B., Ponomarev A.V. et al.* Simulation model “methane” as a tool for effective biogas production during anaerobic conversion of complex organic matter // *Bioresource technology.* 1994. V. 48. Issue 2. P. 1–8.
34. *James R.T.* Sensitivity analysis of a simulation model of methane flux from the Florida Everglades // *Ecological Modelling.* 1993. V. 68. Issues 3–4. P. 119–146.
35. *Степаненко В.М., Лыкосов В.Н.* Численное моделирование процессов тепло- и влагопереноса в системе водоем–грунт // *Метеорология и гидрология.* 2005. № 3. С. 95–104.
36. *Степаненко В.М.* Численное моделирование термического режима мелких водоемов // *Вычислительные технологии.* 2005. Т. 10. Ч. 1. С. 100–106.
37. *Burchard H.* Applied turbulence modeling in marine waters // *Lecture notes in Earth sciences.* Berlin: Springer. 2002. V. 100. 218 p.
38. *Willis G.E., Deardorff J.W.* A laboratory model of the unstable planetary boundary layer // *J. Atm. Sci.* 1974. V. 31. Issue 5. P. 1297–1307.
39. *Kato H., Phillips O.M.* On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid // *Fluid. Mech.* 1969. V. 37. Issue 4. P. 643–655.
40. *Володина Е.Е., Бенгтссон Л., Лыкосов В.Н.* Параметризация процессов тепло- и влагопереноса в снежном покрове для моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши // *Метеорология и гидрология.* 2000. № 5. С. 5–13.
41. *Володин Е.М., Лыкосов В.Н.* Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность–почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1998. Т. 34. № 4. С. 453–465.
42. *Stepanenko V.M., Goyette S., Martynov A. et al.* First steps of a Lake Model Intercomparison Project: Lake-MIP // *Bor. Env. Res.* 2010. V. 15. Special issue. P. 191–202.
43. *Wania R.* Modelling northern peatland land surface processes, vegetation dynamics and methane emissions // *PhD thesis.* 2007. Bristol: University of Bristol. 122 p.
44. *Walter B.P., Heimann M., Shannon R.D. et al.* A process-based model to derive methane emissions from natural wetlands // *Max-Planck-Institut für Meteorologie.* 1996. Report № 215. 15 p.
45. *Шеун Е.В.* Курс физики почв. / М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
46. *McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y. et al.* The fate of rising methane bubbles in stratified waters: what fraction reaches the atmosphere? // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. C09007.
47. *Greinert J., McGinnis D.F.* Single bubble dissolution model – The graphical user interface SiBu-GUI // *Environmental Modelling & Software.* 2009. V. 24. Issue 8. P. 1012–1013.
48. *Paul E.A., Clark F.E.* Soil microbiology and biochemistry / San-Diego: Academic Press, 1996. 340 p.
49. *Bell V.A., George D.G., Moore R.J. et al.* Using a 1-D mixing model to simulate the vertical flux of heat and oxygen in a lake subject to episodic mixing // *Ecol. Model.* 2006. V. 190. Issues 1–2. P. 41–54.
50. *Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N. et al.* Effect of the permafrost thawing on the organic carbon and microbial activity in thermokarst lakes of Western Siberia: important source of carbon dioxide in the atmosphere // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2008.* Abstract № C11A–0486.
51. *Riera J.L., Schindler J.E., Kratz T.K.* Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane in two clear-water lakes and two bog lakes in northern Wisconsin, USA // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1999. V. 56. P. 265–274.
52. *Мамеев Л.Т.* Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 778 с.

53. *Вавилин В.А., Васильев В.Б.* Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1979. 119 с.
54. *Вавилин В.А.* Время оборота биомассы и деструкция органического вещества в системах биологической очистки. М.: Наука, 1986. 144 с.
55. *Tokida T., Miyazaki T., Mizoguchi M. et al.* Falling atmospheric pressure as a trigger for methane ebullition from peatland // *Global Biogeochem. Cycles*. 2007. V. 21. GB2003.
56. *Sander R.* Compilation of Henry's law constants for inorganic and organic species of potential importance in environmental chemistry // <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html>. 1999. 107 p.
57. *Bazhin N.M.* Gas transport in a residual layer of a water basin // *Chemosphere – Global Change*. 2001. V. 3. Issue 1. P. 33–40.
58. *West J.J., Plug L.J.* Time-dependent morphology of thaw lakes and taliks in deep and shallow ground ice // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. F01009.
59. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики / М.: Наука, 1977. 735 с.

## Numerical Modeling of Methane Emissions from Lakes in the Permafrost Zone

V. M. Stepanenko<sup>a</sup>, Machul'skaya<sup>a</sup>, M. V. Glagolev<sup>b, d</sup>, and V. N. Lykossov<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Research Computer Center, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: vstepanenkomeister@gmail.com, ek.machulskaya@googlemail.com*

<sup>b</sup> *Moscow State University, Moscow, 119992 Russia*

*e-mail: m\_glagolev@mail.ru*

<sup>c</sup> *Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina 8, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: lykossov@inm.ras.ru*

<sup>d</sup> *Yugra State University, ul. Chekhova 16, Khanty-Mansiisk, 628012 Russia*

Received June 22, 2010; in final form, August 31, 2010

**Abstract**—A brief review of published observations of methane fluxes to the atmosphere from bogs and lakes in the permafrost zone is presented. Approaches to modeling the emission of methane from bogs are considered, and their advantages and shortcomings, in particular, from the point of view of their coupling to climate models, are outlined. A one-dimensional model developed by the authors for methane generation, transport, and sink in the ground–water body system and coupled to a hydrothermodynamic model of a water body is described. The approaches used in analogous models for bogs as well as new parametrizations describing lake-specific processes are applied. A parametrization of methane generation at the lower boundary of the thawed ground zone underneath a water body (talik) is suggested. The results of calibrating this model against available observations of methane emission from the thermokarst Shchuch'e Lake in northeastern Siberia are discussed.

**Keywords:** Methane, permafrost, lakes, numerical modeling.

---

Сдано в набор 14.12.2010 г.	Подписано к печати 09.03.2011 г.	Формат бумаги 60 × 88 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>
Цифровая печать	Усл. печ. л. 18.0	Уч.-изд. л. 18.1
	Тираж 193 экз.	Зак. 1200
		Бум. л. 9.0

---

Учредители: Российская академия наук,  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

---

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90  
Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”  
Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6