

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата географических наук Ломова Виктора Александровича
на тему: «Эмиссия метана с разнотипных водохранилищ
(по данным измерений и математической модели)» по специальности
1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Актуальность диссертационной работы В.А. Ломова не вызывает сомнений. До настоящего времени нет однозначного ответа на причины современного потепления климата. Рассматривается две основные версии – это потепление вызвано естественными причинами, связанными с цикличностью функционирования комплекса биогеофизических процессов, или основной причиной является влияние человеческой деятельности на все природные процессы на Земле. Согласно второй гипотезе, эта деятельность приводит к росту парниковых газов в атмосфере, в том числе и метана, которые нарушают энергетический и тепловой баланс планеты, что и приводит к росту глобальной и региональной температуры воздуха. Одним из мощных источников метана являются водные объекты, в том числе и водохранилища. Формирование этого парникового газа в водохранилищах до настоящего времени изучено явно недостаточно и не полно. Многие вопросы этого явления не раскрыты, нет достаточно адекватного математического описания процесса метаногенеза. Именно поэтому данная работа, основанная на данных полевых измерений, математическом моделировании образования и анализе пространственно-временной изменчивости метана в разнотипных водохранилищах России, крайне актуальна и своевременна.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 133 источников (из них 35 на русском языке и 98 на английском языке). Объем диссертации – 210 страниц, включает в себя 67 рисунков, 17 таблиц и 1 приложение.

В **первой главе** раскрыта роль метана в экосистеме водохранилищ. Рассмотрены основные процессы, происходящие с метаном в водной

экосистеме, а также приходные и расходные составляющие его баланса в водохранилище. Показано, что процесс анаэробного разложения органического вещества является основным источником метана, выявлены факторы, влияющие на интенсивность генерации метана в донных отложениях. Раскрыто влияние затопления наземных экосистем при создании водохранилищ на процессы метаногенеза: в первые годы интенсивность образования метана растет, со временем – ослабевает. Рассмотрены основные составляющие потока метана из водохранилищ в атмосферу, диффузионный и пузырьковый потоки. Проанализирован процесс окисления метана в водной толще и показано, что интенсивность окисления зависит от концентрации кислорода, температуры, наличия метанотрофных бактерий. Рассмотрена роль макрофитов в транспорте метана, которые могут способствовать выходу метана из донных отложений, из-за чего он напрямую попадает в атмосферу, минуя зону окисления в водной толще. Для водохранилищ большой вклад в эмиссию метана может вносить дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф водохранилищ. Проанализированы особенности цикла метана в зимний период. Показано, что под ледовым покровом происходит накопление метана в воде и во льду. При вскрытии льда весной наблюдается интенсивный выброс накопленного метана в атмосферу. Выполнен обзор исследований эмиссии метана из водохранилищ в различных климатических зонах – от тропической до бореальной зоны. Проанализированы работы, проведенные в Бразилии, Французской Гвиане, США, Канаде, Китае, европейских странах. Проведен анализ состояния изученности эмиссии метана из водохранилищ России. Показано, что, несмотря на наличие отдельных исследований (Волжские водохранилища, некоторые водохранилища Сибири), в целом данных недостаточно для надежной оценки вклада российских водохранилищ в глобальную эмиссию метана. Проанализирована сезонная динамика потоков метана. Выполнен анализ оценок глобальной эмиссии метана из водохранилищ от начала 2000-х годов до современных исследований, который показал их значительную изменчивость.

Во **второй главе** дана характеристика объектов и методов исследования. Объектами исследования являлись 5 водохранилищ России, различающихся по своему географическому положению, гидрологическим режимам, распределением температуры и кислорода по глубине, донным отложениям, степени изученности. Дана детальная характеристика метода «плавучих камер», используемого для отбора проб воды и дальнейшего определения концентраций метана методом парофазной дегазации и расчета его диффузионного потока. Проведена оценка точности используемых методов, которая показала, что погрешность измерения удельных потоков метана в атмосферу составляет около 30%, точность определения концентрации метана в воде – 15%. Представлена общая структура модели LAKE 3.2, включающая блоки расчета термогидродинамики водоема и биогеохимических процессов в нем. Описаны основные уравнения модели для расчета генерации, транспорта и окисления метана.

В **третьей главе** представлены результаты натурных измерений потоков метана на исследуемых водохранилищах и выполнен их детальный анализ. Рассматривается пространственно-временная изменчивость потоков метана, выявляются основные закономерности и определяющие факторы. Особое внимание уделяется выявлению общих закономерностей и специфических черт, характерных для каждого водоема. На основе полученных данных проводится оценка общей эмиссии метана с поверхности исследуемых водохранилищ. Показано, что определяющим фактором для удельных потоков метана из водохранилища является его трофический статус. Содержание органического вещества в грунтах может являться решающим фактором в пространственном распределении удельных потоков метана в водоеме. На эти потоки значительное влияние оказывает проточность водоема. На основе анализа данных по всем исследованным водохранилищам выявлены основные факторы, определяющие интенсивность эмиссии метана: глубина, температура придонной воды, содержание кислорода в придонном слое, скорость деструкции органического вещества в донных отложениях. Показано, что влияние глубины на потоки метана имеет

лимитирующий характер. Для всех водохранилищ выявлена положительная связь между температурой придонной воды и удельными потоками метана. Показано, что увеличение температуры на 10°C в придонных слоях воды приводит к увеличению потоков в 2–3 раза, что связано с ускорением метаногенеза в донных отложениях. Обнаружена обратная зависимость между содержанием кислорода в поверхностном слое и удельными потоками метана. Показано, что при малой концентрации кислорода потоки метана возрастают. На основе данных натурных измерений проведена оценка годовой эмиссии метана для исследованных водохранилищ.

Глава 4 посвящена применению математической модели LAKE 3.2 для расчета потоков метана и оценки его эмиссии из исследуемых водохранилищ. Для каждого рассматриваемого водохранилища осуществлялось воспроизведение температурного и кислородного режима, динамики потоков метана, а также проводится оценка годовой эмиссии метана. Основными метеорологическими параметрами являлись: температура воздуха, атмосферное давление, влажность, скорость ветра, потоки солнечной радиации и осадки. В качестве источника этих данных выбран реанализ ERA5-Land. Также в модели задавались приток воды в водохранилище, расход через гидроузел, уровень воды. Проведен детальный анализ чувствительности модели к различным параметрам. Наиболее чувствительными параметрами для оценки потоков метана являются: коэффициент генерации метана в донных отложениях, температурный коэффициент метаногенеза и максимальная скорость окисления метана в воде. Описаны результаты численных экспериментов по воспроизведению временного хода удельных потоков метана из исследуемых водохранилищ моделью LAKE 3.2. Показано, что модель хорошо воспроизводит основные черты стратификации водоема, адекватно воспроизводит сезонную динамику потоков, полученную по натурным данным. Проведена оценка вклада различных составляющих в общую эмиссию метана: диффузионного потока, пузырькового потока и весеннего выброса при вскрытии льда. Показана хорошая сходимость результатов расчетов по модели и натурных данных. По

результатам расчета по модели LAKE 3.2 были оценены годовые значения эмиссии метана из исследованных водохранилищ, полученные для данных водоемов. Проведен сравнительный анализ удельных и общих величин потоков метана в рассматриваемых водохранилищах. Показано, что наиболее низкие значения потоков метана имеет Бурейское водохранилище. Рассмотрены перспективы дальнейшего развития модели LAKE для улучшения оценок эмиссии метана.

В заключении приведены основные выводы работы.

В работе впервые выявлены основные закономерности формирования важного парникового газа метана в разнотипных водохранилищах на территории России, которые основаны на уникальных натурных наблюдениях и усовершенствованной с участием автора математической модели. Полученные в результате исследования результаты обладают значительной новизной и достоверностью.

Замечания.

1. В работе практически полностью отсутствуют оценки влияния содержания метана в атмосфере на изменения климата. Быть может, есть какие-то корреляции между концентрациями метана и глобальной или региональной температурой воздуха?

2. При оценках годовой эмиссии метана в водохранилищах совершенно не ясно, как оценивался его поток из акватории, полностью покрытой высшей водной растительностью, площадь которой, особенно на Рыбинском водохранилище, является весьма значительной? Не приведены площади открытой воды и занятой высшей водной растительностью.

3. То же самое относится к оценке потока метана в зимний период. Сколько его аккумулируется во льду, как он оценивался для акватории, занятой макрофитами?

4. Как часто в летний период температура придонных слоев в водохранилищах бывает выше 10°C , когда происходит усиленное образование метана в донных отложениях (глава 3)?

Вместе с тем указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (по географическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, и оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Ломов Виктор Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Официальный оппонент:

доктор географических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
гидрологии ФГБУН Институт географии РАН

ЯСИНСКИЙ Сергей Владимирович

«26» ноября 2024 г.

Контактные данные:

Тел.: +7(499)129-04-74, e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
25.00.27. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Адрес места работы:

119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29 стр. 4,
ФГБУН Институт географии РАН, лаборатория гидрологии

Тел.: +7(495)959-00-22, e-mail: direct@igras.ru

Подпись сотрудника лаборатории гидрологии ФГБУН Институт географии РАН
С.В. Ясинского удостоверяю: