

ЭМИССИЯ МЕТАНА НА ГРАНИЦАХ «ВОДА – ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ» И «ВОДА – АТМОСФЕРА» В СЛАБОПРОТОЧНОМ ДОЛИННОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

*Гречушникова М.Г.^{1,3}, Ломова Д.В.³, Ломов В.А.¹, Кременецкая Е.Р.³,
Ефимова Л.Е.¹, Репина И.А.^{2,4}*

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва

²НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва,

³Институт водных проблем РАН, г. Москва,

⁴ ИФА им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

allavis@mail.ru

Введение. Оценка антропогенного влияния на процессы, приводящие к климатическим изменениям, является актуальной научно-практической задачей. Наибольшее количество работ в этой области посвящено изучению влияния диоксида углерода на глобальное потепление, в то же время другим газам, в частности метану, уделено меньше внимания. Концентрация метана в атмосфере ниже, чем у CO_2 , однако потенциал глобального потепления у метана больше [1]: одна его молекула в 28 раз активнее в отношении «парникового эффекта».

Источники метана могут иметь как природное, так и антропогенное происхождение. К крупным природным источникам относят газогидраты, которые образуются на больших глубинах в океане при определенных условиях и содержат значительные объемы этого газа [2]. Метан выделяется с поверхности Мирового океана, болот, озер, при вулканических выбросах и т.д. К антропогенным источникам относят значительное увеличение поголовья крупного рогатого скота, рисовые поля, промышленные и бытовые свалки, а также искусственные водоемы [3].

В водных объектах метан образуется в донных отложениях (ДО) при разложении органического вещества (ОВ) в отсутствие кислорода. Это сложный биохимический процесс, в котором задействована группа микроорганизмов – метаногенов. Метан, поднимающийся от придонных слоев воды к поверхности, попадает в атмосферу. Оценить эмиссию метана из водных объектов, особенно из водохранилищ, как антропогенного источника CH_4 , – актуальная задача, поскольку наибольший прирост площади искусственных водоемов приходится на вторую половину XX века. По различным оценкам поток метана из водохранилищ мира составляет от 2-х до 122-х млн. т/год, что составляет от 0,5 до 10% от его глобальной эмиссии в атмосферу [4]. Различия в оценках связаны с тем, что они проводились на основе параметризации характеристик водоемов (средняя глубина, проточность, трофический статус, географическое положение и т.д.). Измерений потока метана непосредственно на водохранилищах на данный момент в мире не так много – наблюдениями охвачены менее 180-и искусственных водоемов [5]. На территории России проводились исследования на озере Байкал [6], Саяно-Шушенском водохранилище [7], а также на некоторых водохранилищах Волжско-Камского каскада [8, 9] и ряде других водных объектов. Необходимо отметить, что не все экспедиционные работы имели регулярный характер, поэтому пространственно-временная изменчивость потока метана изучена недостаточно. В данной работе в качестве объекта было выбрано Можайское водохранилище с хорошо изученным гидрологическим режимом.

Основная цель исследований – определить пространственно-временную изменчивость эмиссии метана в Можайском водохранилище, а также факторы, влияющие на его потоки.

Объект и методы исследований. Слабопроточное долинное Можайское водохранилище расположено в верхней части бассейна р. Москвы (коэффициент водообмена $K_v = 1,2 - 1,8$), площадь водного зеркала при НПУ = 30,7 км², объем = 0,22 км³ [10]. Исследования содержания и эмиссии метана проводились на 5-и опорных станциях над затопленным руслом реки Москвы в наиболее характерных участках водоема и включали в себя зондирование водной толщи, отбор проб воды, воздуха и ДО для последующего анализа в лаборатории. В течение летнего периода проводились рейдовые наблюдения на опорной вертикали в средней части водоема.

Зондирование водной толщи производилось кондуктометром и оксиметром YSI, донные отложения отбирались дночерпателем Экмана-Берджа, эксперименты по выходу метана из дна проводились по методике Кузнецова-Романенко [8]. Отбор проб воды производился батометром Рутнера, определение концентрации метана проводилось газохроматографическим методом. Диффузионный поток метана на границе «вода – атмосфера» рассчитывался методом TBL (thin boundary layer) в зависимости от концентрации метана в поверхностном слое [11]. Общий поток, включая пузырьковую составляющую, производился инструментально методом «плавучих камер» [11]. В 2018 году метод «плавучих камер» был модернизирован, смонтирован новый прибор – диффузионная камера (рис. 1), которая позволяет разделить измерение пузырькового и диффузионного потока [11]. Отличие новой камеры состоит в том, что на глубине 70 см под ней располагается экран, отклоняющий пузырьки метана. При сравнении двух способов определения диффузионного потока – расчет (TBL) и измерения (диффузионная камера), установлено, что оба метода дают схожие результаты.

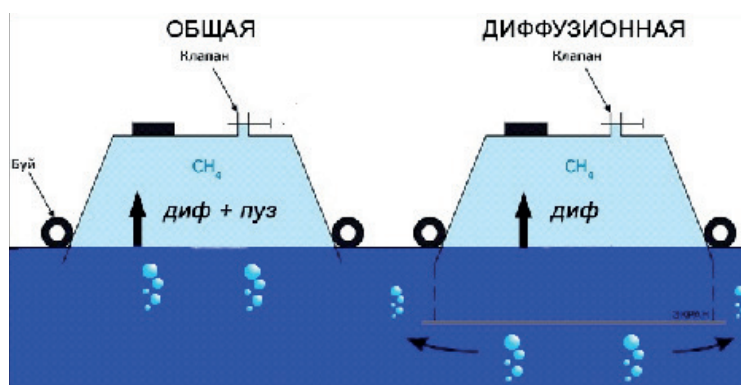


Рисунок 1. Схема «плавучих камер»: общей и диффузионной
(диф – диффузионная составляющая потока, пуз – пузырьковая составляющая потока)

Результаты и обсуждение. Детальное изучение пространственно-временного изменения потоков метана в атмосферу было проведено по наиболее многочисленным и подробным измерениям в 2017 и 2018 гг. При концентрациях кислорода в придонных горизонтах менее 1 мг/л метан, поступающий из илов, может накапливаться, что приводит к увеличению его поступления к вышележащим горизонтам воды. При концентрациях O_2 более 1 мг/л поступающий из дна метан в значительной степени подвержен окислению.

Получена зависимость потока метана из ДО от показателя потребления O_2 в придонной воде (ППВ), которая, в свою очередь, зависит от активности деструкционных процессов (рис. 2А). Зависимость от деструкции ОВ в придонном слое воды прослеживается только в средней и верхней частях водохранилища, где наиболее выражено увеличение температуры воды в придонных горизонтах.

Для глубоководных участков важным показателем является устойчивость придонного слоя воды (рис. 2Б), которая препятствует перемешиванию придонных слоев воды и насыщению их кислородом, что ведёт к накоплению метана в гипolimнионе. Кроме того,

большая устойчивость водной толщи препятствует поступлению на дно свежего легко-разлагаемого ОВ, ограничивая перемешивание, что особенно заметно проявляется на глубоких станциях в приплотинном районе водохранилища, из-за чего величина потока метана из дна снижается.

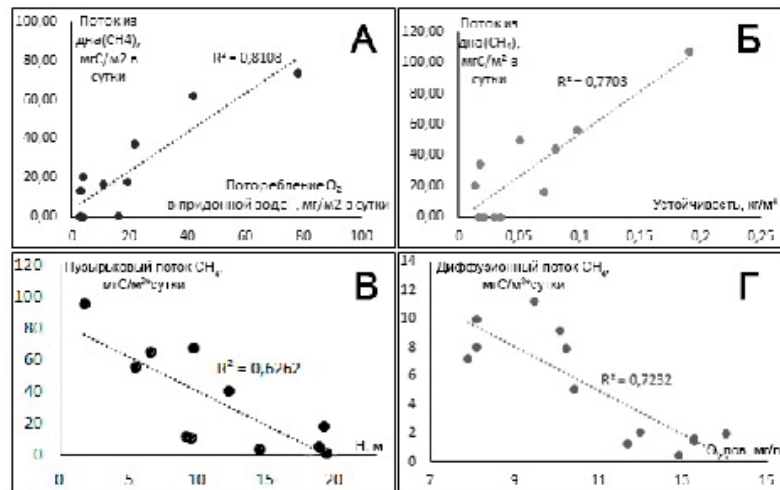


Рисунок 2. Зависимость различных составляющих потока метана от факторов гидрологической структуры (А – поток из дна в верхней и средней части водоема в зависимости от потребления O_2 придонными горизонтами воды, Б – поток из дна в низовьях водоема в зависимости от устойчивости, В – пузырьковая составляющая потока в атмосферу в зависимости от глубины вертикали при содержании O_2 ниже 1 мг/л и придонного содержания метана менее 100 мкл/л, Г – диффузионная составляющая потока в атмосферу в зависимости от содержания O_2 у поверхности)

За период наблюдений можно отметить уменьшение потока CH_4 из илов от зоны выклинивания подпора до глубоководного приплотинного участка (рис. 3). Максимальные измеренные значения в приплотинном плёсе за всё время наблюдений не превышали 56 $мгC-CH_4/(м^2*сут)$ (2017 год), в то время как в верховьях достигали 196 $мгC-CH_4/(м^2*сут)$ (2018 год). Оба максимума наблюдались в августе, так как к этому сроку формируется бескислородная зона в гипolimнионе по всему водоему. В начале лета в период прогрева водохранилища поток из ДО значительно меньше, так как аноксидная зона в водоеме только начинает формироваться, причем начиная с центрального участка.

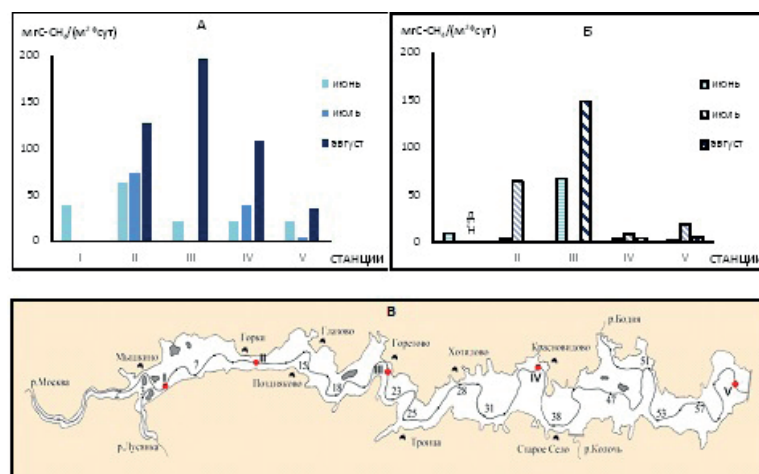


Рисунок 3. Поток метана из донных отложений (А) и в атмосферу (Б) по данным измерений 2018 г. и схема расположения станций измерений (В)

Метан, поступающий из ДО в придонные горизонты воды, поднимается к поверхности в виде двух основных составляющих – диффузионной и пузырьковой. Пузырьковый поток

возникает при перенасыщении придонной воды метаном и мало подвержен окислению. Однако, при попадании в слои, менее насыщенные метаном и пересыщенные кислородом, пузыри могут растворяться.

Найдена зависимость потока метана в атмосферу от толщины бескислородной зоны (при содержании O_2 в воде менее 1 мг/л). При толщине этого слоя менее 2,5-3 м (то есть при отсутствии аноксии или на стадии ее формирования даже при содержании растворенного O_2 в воде у дна менее 0,5 мг/л) поток метана в атмосферу не превышал 20 мгС/(м²*сут). При толщине аноксидной зоны более 3-х м (длительный дефицит кислорода в придонных горизонтах) эмиссия метана изменялась от 20 до 149 мгС/(м²*сут). В таких условиях начинает преобладать пузырьковый поток, и его доля может достигать 95% от общего потока метана в атмосферу. Кроме размеров аноксидной зоны, на пузырьковый поток влияет и общая глубина станции. При концентрации CH_4 у дна менее 100 мгС/(м²*сут) получена обратная зависимость пузырьковой эмиссии метана от глубины (см. рис. 2В). При более высоких концентрациях зависимости не наблюдается, поскольку при значительном накоплении метана в придонном горизонте интенсивность пузырькового потока возрастает настолько, что позволяет достигать поверхности практически вне зависимости от глубины.

Диффузионный поток в меньшей степени зависит от глубины, так как его скорости невелики, и основной фактор, определяющий его интенсивность – содержание кислорода в поверхностном слое (см рис. 2Г). В связи с этим наибольшие изменения величины диффузионного потока наблюдаются во внутрисуточном ходе – с наименьшими величинами днем (при активном фотосинтезе) и наибольшими – ночью, когда увеличению потока метана в атмосферу способствует еще и конвекция при ночном охлаждении.

Наиболее детальное изучение временной изменчивости потока метана в атмосферу за летний период было проведено в средней части водоема на ст. IV (см. рис. 3), где регулярно проводились рейдовые наблюдения в течение четырех лет наблюдений (рис. 4).

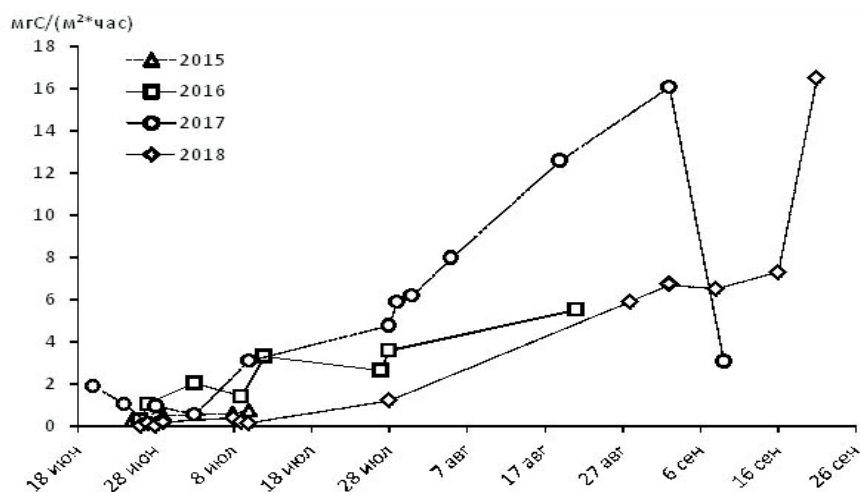


Рисунок 4. Изменение общего потока метана за летний период 2015-2018 гг. на рейдовой вертикали в средней части водохранилища

Общая тенденция изменений потока метана за летний период характеризуется увеличением с максимумом в конце августа/начале сентября в зависимости от сроков разрушения стратификации. На величину потока влияет синоптическая обстановка: в периоды теплой и безветренной погоды, когда в водоеме у дна начинает формироваться бескислородная зона, концентрация CH_4 в придонном слое воды растет из-за анаэробной деструкции в илах, и увеличивается эмиссия в атмосферу. Из-за регулярного перемешивания самые высокие значения температуры придонной воды наблюдались в 2017 г., а

эмиссия в этот период была выше по сравнению с другими годами. При прохождении атмосферных фронтов, которые часто сопровождаются штормами, происходит перемешивание водной толщи, заглубливание, а иногда и разрушение металимниона и аэрация придонных слоев воды, что приводит к окислению накопившегося у дна метана и уменьшению интенсивности его потока. Это отражается на ходе эмиссии – замедление роста её значений или их уменьшение совпадает с периодами прохождения штормов и преобладания на водоеме ветреной погоды. Аналогичное уменьшение может быть связано с бурным «цветением» воды при пересыщении кислородом поверхностного слоя, что наблюдалось в первой декаде сентября в 2018 г. Наибольшие значения потока метана (около 16 мгС/м²*час) характерны в начале периода осенней конвекции, что связано с разрушением стратификации и перемешиванием водоема до дна.

Выводы. Величина потока метана на границе «вода – атмосфера» в долинном слабопроточном водохранилище имеет значительную пространственно-временную изменчивость. Факторы, определяющие величину потока метана из илов водоема для разных районов водохранилища, различны: в глубокой его части в роли основного фактора выступает устойчивость водной толщи, а в более мелкой верхней части – интенсивность окислительных процессов.

Пузырьковый поток метана преобладает над диффузионным, и его доля увеличивается с ростом придонной концентрации CH₄, которая, в свою очередь, зависит от толщины аноксидной зоны и продолжительности ее существования в гипolimнионе. При концентрациях метана до 100 мкл/л пузырьковый поток зависит от глубины, а при более высоких значениях зависимость не наблюдается. Диффузионный поток зависит от содержания кислорода в воде. В течение лета происходит постепенное увеличение потока метана в атмосферу, который достигает максимума перед началом фазы осеннего перемешивания.

Литература

1. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) // URL: <https://www.ipcc.ch/>
2. Giavarini C., Hester K. Environmental Issues with Gas Hydrates // London: Gas Hydrates, Green Energy and Technology. 2011. pp. 159-172.
3. Ehhalt D.H. The atmospheric cycle of methane // Colorado: Tellus XXVI, 1973, pp. 58 – 70.
4. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A Global Assessment // Berlin: Water Resources Development and Management. 2012. 410 p.
5. Deemer R., Harrison A., Beaulieu S. Li, J., Delsontro T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // Springer. BioScience. 2016. Vol. 66. № 11. pp. 949-964.
6. Пестунов Д.А., Домышева В.М., Иванов В.Г., Шамрин А.М., Панченко М.В. Пространственное распределение направления потоков CO₂ и CH₄ по акватории озера Байкал // Томск: Оптика атмосферы и океана. 2015. Вып.: 28. №9, с. 792-800.
7. Федоров М.П., Елистратов В.В., Масликов В.И. Исследования эмиссии парниковых газов с водохранилищ ГЭС России // М.: Гидротехническое строительство. 2014. № 11. с. 52–58.
8. Дзюбан А.Н. Опыт оценки эмиссии метана на водных объектах урбанизированных территорий в бассейне рыбинского водохранилища // М.: Водные ресурсы. 2010. Том 37. № 4. с. 502-504.
9. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Пространственно-временные закономерности распределения содержания метана в водохранилищах. Симферополь: Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Том 10. №1. с. 450-466.
10. Комплексные исследования водохранилищ: сб. науч. тр. / вып.3. под ред. Быкова В.Д. М.: изд. МГУ. 1979. 400 с.
11. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // N.Y.: Environmental science & technology. 2010. Vol.44. pp. 5450-5455.