Влияние гидрологической структуры на обменные процессы между водой и донными отложениями в можайском водохранилище

**Л.Е.Ефимова**1, **В.А. Ломов**1,**М.Г. Гречушникова**1,2**, Д.В. Ломова**2, **Е.Р. Кременецкая**2

[ef\_river@mail.ru](mailto:ef_river@mail.ru), [lomson620@mail.ru](mailto:lomson620@mail.ru), [allavis@mail.ru](mailto:allavis@mail.ru), [florainter@mail.ru](mailto:florainter@mail.ru), [ekrem72@yandex.ru](mailto:ekrem72@yandex.ru)

*1 МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, Главное здание, Географический факультет*

*2ИВП РАН,* [*Москва, улица Губкина, 3*](https://yandex.ru/maps/?text=%D0%B8%D0%B2%D0%BF%20%D1%80%D0%B0%D0%BD&source=wizbiz_new_map_single&z=14&ll=37.565147%2C55.695758&sctx=ZAAAAAgBEAAaKAoSCWvVrglpz0JAEf8%2B48KB4EtAEhIJk%2FyIX7GG5D8Raw2l9iLa3T8iBAABAgMoATABOLrj9uft0YG5LEDVAUgBVQAAgD9YAGIScmVsZXZfZHJ1Z19ib29zdD0xagJydXABlQEAAAAA&oid=1029866576&ol=biz)

**Аннотация:** Представлены результаты исследований обменных процессов на границе «вода - донные отложения» за 2017-18гг в летний период в Можайском водохранилище. Проанализированы факторы, определяющие величину потоков метана и минерального фосфора из донных отложений, а также его пространственная неравномерность, связанная с особенностью распределения грунтов в водохранилище долинного типа.

**Ключевые слова:** метан, фосфор, водохранилище, донные отложения, обменные процессы.

**Введение**. Между донными отложениями (ДО) и придонными слоями водной толщи постоянно протекают обменные процессы массо- и газообмена как в аэробных, так и в анаэробных условиях в зависимости от гидрологической обстановки в водоёме. Без учета процессов бактериальной деструкции органического вещества (ОВ) в ДО и миграции метана, который служит важной составляющей частью деструкционных процессов, невозможно понимание закономерностей функционирования всей водной экосистемы. При минерализации ОВ в ДО высвобождаются фосфаты, которые поступают в поровый раствор [6]. Выход фосфора из донных отложений может приводить к вторичному загрязнению водной толщи биогенными веществами.

Разложение ОВ в илах происходит в результате деятельности различных микроорганизмов (как аэробных, так и анаэробных) [12]. Необходимым условием для активности метаногенных бактерий являются анаэробные условия в донных отложениях. На процессы деструкции ОВ оказывают влияние различные факторы окружающей среды: температура воды, содержание в ней растворённого кислорода, наличие в грунтах легкоокисляемого ОВ и т.д.

Целью настоящей работы было - оценить влияние различных факторов, оказывающих воздействие на интенсивность потоков метана и минерального фосфора (Рмин) в водную толщу.

**Объект исследования.** Исследования проводились на Можайском водохранилище - типичном димиктическом водохранилище долинного типа сезонного и многолетнего регулирования стока, расположенном в верховьях реки Москвы. Площадь водного зеркала при НПГ равна 30,68 км2, длина 28 км, средняя ширина 1,1 км. Объем водохранилища 235,18 млн. м3, средняя глубина 7,66 м, средний размах колебаний уровня воды в течение года 6 м. Годовой коэффициент водообмена равен в среднем 1.8 год-1 [4]. В период летней стратификации в гиполимнионе Можайского водохранилища в последние десятилетия наблюдалось развитие аноксидных зон, величина которых уже к середине июля могла достигать 30% объема водохранилища [5].

**Материалы и методы исследования.** Оценка интенсивности валовой деструкции ОВ (Добщ) на границе «вода-дно» проводилась методом В.И.Романенко и С.И.Кузнецова [2,7] и определялась по количеству выделяемой из иловой колонки в придонную воду НСО3-. Величина аэробной деструкции (Даэр) определялась по количеству потребляемого кислорода в трубке с илом, анаэробная деструкция (Данаэр) – как разница предыдущих двух величин. Для удобства сравнения величины потоков пересчитывались на углерод. Содержание метана в воде определялось методом газовой хроматографии [8,10] Потоки метана F(CH4) и фосфора F(P) также рассчитывались по разнице концентраций этих элементов в контрольной трубке и трубке с иловой колонкой. Величина потока метана также пересчитывалась на углеродные единицы (мгС/м2сут). Эксперимент проводился при двух условиях – в холодильнике при температуре около 10оС и при комнатной температуре – около 20оС, для того, чтобы при расчетах брать тот, поток метана, который ближе к условиям *in situ*.

В качестве характеристик гидрологический структуры рассматривались стратификация водной толщи, устойчивость придонного слоя воды к перемешиванию и толщина аноксидного слоя воды.

**Результаты и обсуждение.** Во время июньских съемок при достаточно высоком уровне деструкционных процессов в ДО (выход НСО3 в лабораторных условиях достигал 800 мгС/м2сут) выход СН4 из ДО даже при низком (менее 1 мг/л) содержании О2 в придонной воде составлял менее 40 мгС/м2сут, выход Рмин из илов русловой ложбины изменялся от 8 до 14 мгР/м2сут. Водохранилище было сильно стратифицировано – средний вертикальный градиент температуры составлял около 1оС/м, а максимальный – 2.5 – 3 оС/м.

К августу в оба года практически по всему водохранилищу, кроме зоны выклинивания подпора, создавались аноксидные условия в гиполимнионе, интенсивность деструкционных процессов в илах, оцененных по выходу НСО3, снижалась до 50-200 мгС/м2сут, а поток метана возрастал до 200 мгС/м2сут. Выход Рмин в это время достигал 24 мгР/м2сут. Средний вертикальный градиент температуры изменялся от 0.3 до 0.9 около 1оС/м, максимальный – 1 – 2 оС/м.

Важной задачей было выявление наиболее значимых факторов, определяющих поток метана из донных отложений. Связь с температурой воды отмечалась только в период прогрева толщи водоема в начале лета. Прослеживается хорошая зависимость (r2 = 0.86) между потоком метана, определенным по «холодному» эксперименту и отношением температуры в лабораторных условиях к температуре in situ за июнь в 2017 -18 гг. Таким образом, при изучении потоков метана необходимо учитывать температуру придонного слоя воды в водоёме, при которой происходило формирование бактериоценоза в ДО. Значение потока метана принималось либо по «холодному», либо по «теплому» эксперименту в зависимости от температуры воды in situ.

В целом, за всё время наблюдений можно отметить увеличение потока СН4 из илов от глубокого приплотинного участка к зоне выклинивания подпора. Максимальные измеренные значения в приплотинном плёсе за всё время наблюдений не превышали 56 мгС/м2сут (2017 год), в то время как в верховьях достигали 196 мгС/м2сут (2018 год). Оба максимума наблюдаются в августе так как к этому моменту формируется мощная бескислородная зона в гиполимнионе по всему водоему. В начале лета в период прогрева водохранилища поток из ДО значительно меньше, так как аноксидная зона в водоеме только начинает формироваться.

Важнейшее условие для деятельности бактерий метаногенов – низкое содержание О2 в воде [9]. На рис.1 представлен график связи между содержанием кислорода в трубке, в которой находился отобранный грунт, и потоком метана. Величина потока имеет в целом обратную зависимость от содержания О2, однако (как видно на рис. 1) в некоторых случаях наблюдался выход метана при содержании О2 более 1 мг/л.



Рис.1. Связь потока СН4 с содержанием О2 в трубке, поставленной на экспозицию.

Поскольку после установления плотностной стратификации аноксидные условия в гиполимнионе развиваются постепенно, имеющиеся данные были разделены по толщине слоя воды с содержанием О2 менее 1 мг/л (на станции в момент отбора) на 2 группы. К первой группе отнесены данные для станций с толщиной аноксидного слоя в столбе воды не больше 1 м, т.е. аноксидные условия либо отсутствовали, либо только начали развиваться в придонном горизонте. Во вторую группу вошли станции с толщиной аноксидного слоя более 1 м, где малокислородные условия продолжались уже какое-то время.Глубина проникновения О2 в донные отложения связана с интенсивностью процессов его потребления в придонном слое воды и на верхней границе самих ДО. Чтобы учесть эти процессы был предложен параметр (ППВ+Даэр), показывающий суммарную интенсивность процесса аэробного потребления О2 донными отложениями и интенсивность деструкции ОВ в 10-см слое придонной воды, непосредственно контактирующей с ДО.

Для первой группы точек (рис 2 а) была получена связь выхода СН4 с суммарной аэробной деструкцией ОВ в ДО и придонной воде, которая объясняется тем, что чем выше скорость потребление кислорода грунтами и придонной водой, тем быстрее создаются аноксидные условия в грунте. Кроме того, поступающий из ДО метан интенсифицирует потребление О2 в воде. Для второй группы (рис. 2 б) была получена зависимость выхода СН4 от содержания кислорода в воде над илом.

|  |  |
| --- | --- |
| а) | б) |
|  |  |
| Рис.2 Связь потока СН4 с суммарным показателем аэробной деструкции ОВ в ДО и придонной воде при толщине слоя с содержанием О2<1 мг/л на станции не более 1 м (а) и с содержанием О2 в эксперименте при толщине слоя с содержанием О2<1 мг/л на станции более 1 м (б) | |

Общее содержание органического вещества и влажность грунта (косвенный показатель «свежести» ОВ) не имеют хорошо выраженного влияния на поток метана ни для отдельных месяцев, ни для разных районов водохранилища. Можайское водохранилище характеризуется мезотрофным статусом, поэтому в водоеме в течение всего летнего периода присутствует новообразовавшееся ОВ, которое активно подвергается разложению метаногенами.

Для разных районов водохранилища факторы, влияющие на поток метана из дна различны. Так, для более глубоководных среднего и нижнего районов, важный показатель – устойчивость придонного слоя воды к перемешиванию. Зависимость потока метана от устойчивости придонного слоя воды для этих районов прямая (r2 = 0,77). Устойчивость придонного слоя воды на глубоких станциях препятствует обогащению поверхности илов кислородом, что ведёт к увеличению интенсивности метаногенеза. Для верховьев водоема, где достаточно часто водная толща перемешивается до дна, устойчивость придонного слоя воды не оказывает влияние на величину потока метана. Для этой части водохранилища температура придонной воды определяет интенсивность деструкции ОВ, стимулируя интенсивность деятельности донных микроорганизмов (r2 = 0,68).

Поток фосфора со дна формируется вследствие следующих процессов [6]: деструкции фосфоросодержащей части ОВ на беспрерывно обновляющейся поверхности дна; поступления фосфора из более глубоких слоев ДО; десорбции фосфора из илов, происходящей преимущественно при аноксидных условиях; конвективного потока фосфора с выделяющимися из ДО пузырьками газа (в водоемах с активным газоотделением). Проведенные на Можайском водохранилище исследования [1,11] показали, что наиболее значимыми факторами, влияющими на интенсивность потока Р из ДО в воду в этом водохранилище, являются десорбция фосфатов и деструкция ОВ.

Содержание Р2О5 в илах русловой ложбины Можайского водохранилища в верхней и средней частях водохранилища составляло 5-6 мг/г и лишь в приплотинном районе снижалось до 3,5 мг/г.

В ходе анализа имеющиеся данные по выходу Рмин были также разделены на 2 группы по толщине слоя воды с содержанием О2<1 мг/л (рис. 3). Для случаев с толщиной слоя с содержанием О2<1 мг/л менее 1 м для илов ложбины была обнаружена связь выхода Рмин с содержанием ОВ в грунте (кроме приплотинного района, где содержание Р2О5 в илах почти в два раза меньше, чем в остальной части водохранилища). Для второй группы точек (случаев с толщиной слоя с О2<1 мг/л более 1 м) отмечается связь величины выхода Рмин с суммарной анаэробной деструкцией ОВ в ДО (выхода НСО3 и СН4), т.е. деструкцией ОВ не только на поверхности ила, но и включающей в себя разложение органического вещества метаногенными бактериями в более глубоких слоях ДО [3].

|  |  |
| --- | --- |
| а) | б) |
|  |  |
| Рис. 3. Связь выхода Рмин с ОВ для случаев с толщиной слоя с О2<1 мг/л менее 1 м (а) и с суммарной анаэробной деструкцией ОВ (анаэробного потока НСО3 и метана) для случаев с толщиной слоя с О2<1 мг/л более 1 м (б). | |

**Выводы**. Газо- и массообмен на границе «вода – донные отложения» – сложный и многофакторный процесс, на который оказывает влияние гидрологическая структура водохранилища (стратифицированость водной толщи).

Величина потока метана из ДО изменяется в зависимости от развития аноксидной зоны в водоеме. Интенсивность аэробных процессов, протекающих в придонном слое воды и верхнем слое ДО оказывает влияние на поток метана из грунтов.

Для разных районов водохранилища факторы, оказывающие решающее влияние на обменные процессы, различны. Так, для потока метана, кроме содержания кислорода у дна, на глубоководных участках определяющим фактором является устойчивость придонного слоя воды. На участках с глубинами меньше 8м основным фактором выступает температура придонного слоя воды, как стимулятор деструкционных процессов.

При толщине аноксидного слоя меньше 1м выход фосфора из ДО увеличивается с ростом содержания ОВ в верхнем слое ДО. При условиях длительной аноксии (толщина аноксидного слоя больше 1м) выход фосфора зависит от интенсивности деструкционных процессов в илах.

**Список литературы**

1. Гашкина Н.А. Закономерности и оценка круговорота фосфора в системе вода-донные отложения в эвтрофном водохранилище – автореферат дисс.на соиск.уч.степ.кгн, Москва, 2003 – 20с.
2. *Дзюбан А.Н.* Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов – Принтхаус, Ярославль, 2010 – 192 с.
3. Дзюбан А.Н. Численность бактерий и процессы превращения метана в донных отложениях водохранилищ Волги и Камы //Микробиология, 1998, Т.67, №4. С.573-575.
4. Коллектив авторов под редакцией Быкова В. Д. Комплексные исследования водохранилищ. Вып.3. Можайское водохранилище. — изд-во Московского университета, Москва, 1979. — 400 с.
5. Кременецкая Е.Р., Перекальский В.М,, Бреховских В.Ф., Ломова Д.В. Ороли гидрометеорологических факторов в формировании аноксидной зоны в водохранилище долинного типа//Метеорология и гидрология, 2009. №.10. С 69-78.
6. Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: «Наука». 2010.243с.
7. *Романенко В.И., Кузнецов С.И.* Деструкция органического вещества в иловых отложениях – Микробиология, Санкт-Петербург, 1972. – Т. 41., № 2., С. 356-361.
8. Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосостемах. Из-во «Копицентр».Ростов-на-Дону – Москва.2005. 329с.
9. *Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate – Global Biogeochemical Cycles, 2004 – Vol.18.
10. 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.
11. Borovek J. Chemical composition and phosphorus fractionation of sediments in the Bohemian forest lakes //Silva Gabreta/ 2000. Vol.4 P.179-184.
12. *The World Bank* Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs – International Hydropower Association, 2010 – January.