

ЭНЕРГО- И ГАЗООБМЕН РАВНИННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ С АТМОСФЕРОЙ ПО ДАННЫМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Репина И.А.^{1,2}, Гречушникова М.Г.², Степаненко В.М.²,

Варенцов М.И.^{2,1}, Артамонов А.Ю.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

E-mail: repina@ifaran.ru

Аннотация

В докладе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия атмосферы и поверхности на примере двух водохранилищ: Можайского и Горьковского. Результаты всепогодных экспериментальных исследований газо-, энергообмена, гидрологических и биогидрохимических характеристик позволяют выявить периоды эмиссии парниковых газов и ее связь с метеорологическими и гидрологическими условиями. Для исследования био-гидрохимического режима водохранилищ используется модель водоема LAKE. Данные дистанционного зондирования применяются для исследования термического режима поверхности водохранилищ, динамики береговых зон, характеристик ледообразования и снегонакопления.

Ключевые слова: равнинные водохранилища, эмиссия метана, потоки тепла и влаги, дистанционное зондирование

Водоохранилища стали неотъемлемой частью жизни и развития равнинных регионов России. Там, где раньше были лишь небольшие речки, теперь простираются водные просторы – не случайно их называют «морями». И берега этих «морей» интенсивно заселены и являются регионами активной экономической деятельности. Характеристики водной поверхности существенно отличаются от характеристик суши, что вносит существенные изменения в режим взаимодействия атмосферы и поверхности [1]. Поэтому, кроме очевидного хозяйственного значения, водохранилища стали и источником проблем, с которыми раньше жители удаленных от морей равнин не сталкивались – это и изменение ветрового режима, и повышенное влагосодержание атмосферы, которое приводит к туману, гололедам и изморози. Большие резервуары воды изменили климат прилегающих территорий, и эти изменения продолжают происходить, часто бывая причиной экстремальных погодных явлений. Кроме того, водохранилища являются источниками эмиссии парниковых газов, в особенности метана и углекислого газа, что также вносит вклад в глобальные климатические

изменения [2]. Изучение последствий создания искусственных водоемов было начато в 50-х годах прошлого века и продолжается до сих пор. Исследования, в том числе и образования туманов и гололеда, проводятся как на основе данных мониторинга, так и помощью моделей различного пространственного разрешения [3,4].

Возникающие над водохранилищами ветровые циркуляции и конвективные явления могут носить опасный и даже катастрофический характер. Над акваторией крупных водохранилищ изменяется радиационный баланс, температура воздуха на прилегающих к водохранилищу территориях понижается весной и в первую половину лета (охлаждающее воздействие) и повышается во второй половине лета и осенью (отепляющее воздействие); происходит сдвиг дат перехода температур воздуха через основные градации, увеличивается абсолютная и относительная влажность воздуха. Увеличивается скорость и меняется направление ветра, возникают ветры типа бризов. Водоохранилища оказывают влияние на облачность и осадки, вызывая явления, подобные озерным снегопадам. Создание водохранилищ на равнинной части России привело к ослаблению континентальности климата их побережий. Крайне неблагоприятным последствием создания крупных водохранилищ, вызванным изменением термического режима, является незамерзающая полынья в нижнем бьефе, способствующая туманообразованию.

Но, несмотря на наличие многих работ по оценкам эмиссии метана с поверхности водохранилищ, данный вопрос остается открытым. При этом многочисленные исследования в различных регионах мира (преимущественно в Канаде, США и Бразилии), показали, что интенсивность этой эмиссии может существенно различаться в зависимости от их возраста, проточности, сезона наблюдений и многих других факторов. В настоящее время планируется внесение изменений в действующее законодательство Российской Федерации, регулирующее выбросы парниковых газов и компенсацию углеродного следа хозяйствующих субъектов. И здесь роли водохранилищ будет уделено особое внимание.

Определение содержания метана и углекислого газа в водохранилищах и их эмиссии в атмосферу актуально не только с точки зрения изучения процессов глобального изменения климата, но и мониторинга качества воды. Газовый режим является важным показателем экологического состояния водных объектов. Содержание метана в водохранилищах зависит от соотношения, с одной стороны, его потока из донных отложений, непосредственного образования в воде, поступления с поверхности водосбора, в том числе с притоками и в составе промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, с другой стороны – от окисления метана в воде и его эмиссии в

Рис. 1 - Плотность потока метана по данным измерений плавучими камерами (мгСН₄-С/(м² час)) и доля диффузионного потока (DF, %) по данным измерений 2018 г.

В проточном Горьковском водохранилище при отсутствии продолжительных бескислородных условий в придонном горизонте удельный поток метана по данным эпизодических наблюдений не превышал 1,6 мг С-СН₄/(м² час)

Данное значение соотносится со значениями диффузионного потока на слабопроточном водохранилище в начале сезона. Из-за отсутствия выраженной стратификации пузырьковая составляющая потока метана, по-видимому, отсутствует.

Различия концентраций метана в придонном и поверхностном горизонтах не превышают 15 мкл/л, а в слабопроточном водохранилище они различаются в конце сезона на 3 порядка. За период открытой воды (01.05-31.10), несмотря на малую величину удельного потока метана, из-за большой площади с озерной части Горьковского вдхр. поступает в атмосферу $0,7 \cdot 10^9$ гС-СН₄. За аналогичный период из небольшого по площади Можайского вдхр. в 2017 и 2018 г. оценка эмиссии составила $0,6 \cdot 10^9$ и $0,35 \cdot 10^9$ гС-СН₄.

Для расчета гидрохимического режима водохранилища использовалась одномерная модель термогидродинамики и биогеохимии водоёма LAKE 2.1. Была проведена адаптация модели LAKE для проточных водоемов, а также обобщение традиционной одномерной модели для воспроизведения среднего горизонтального градиента давления и связанных с ним сейшевых колебаний 1-й горизонтальной моды. Рисунок 2 показывает вертикальное распределение концентрации метана в Можайском водохранилище в летний период на примере 2016 г. по данным наблюдений и расчётов. В модели калибровалась максимальная скорость окисления метана кислородом в формуле Михаэлис-Ментен, поскольку она эффективно контролирует содержание СН₄ в верхнем перемешанном слое; величины остальных констант биогеохимического блока оставлены значениями по умолчанию. Эмпирические кривые получены по данным измерений в различных частях водохранилища, что определяет их высокий разброс (измерения на одной и той же глубине относятся к придонному слою в одних точках, и к середине водной толщи – в других). Поскольку одномерная модель по построению рассчитывает горизонтально-осреднённые величины, из Рисунка 2 можно заключить, что она успешно воспроизводит вертикальное распределение концентрации метана. По данным и измерений, и модели, содержание СН₄ растёт с глубиной на 1-2 порядка (с приближением к источнику метана – донным

отложениям и с уменьшением концентрации O₂) и со временем (в придонном слое в несколько раз с начала июля по конец августа), по мере истощения кислорода под термоклином.

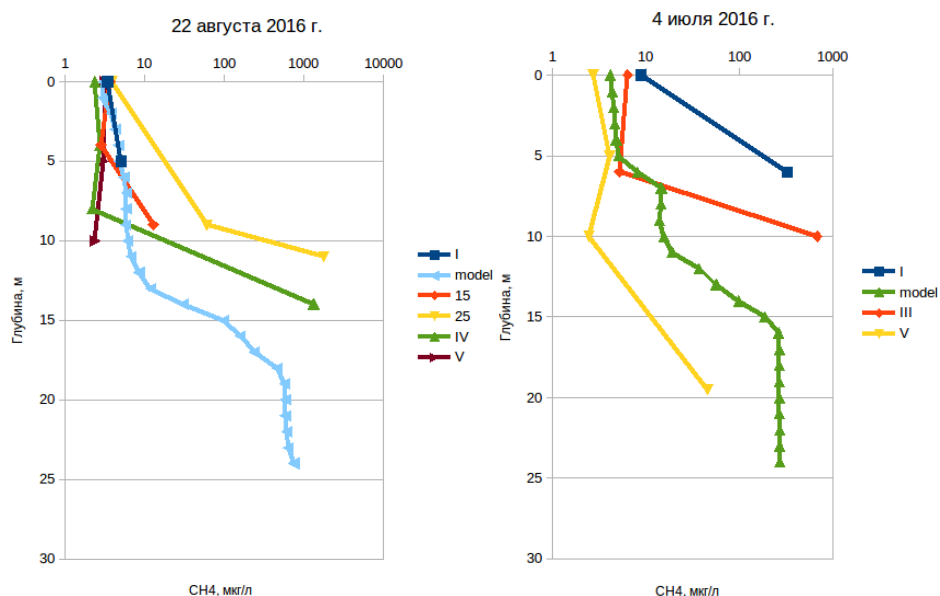


Рис. 2 - Вертикальное распределение концентрации метана в Можайском водохранилище по данным измерений и моделирования. Римскими и арабскими цифрами помечены различные части водохранилища (станции от I до V расположены от верховий к дамбе)

Проведен анализ возможности оценки эмиссии метана из водохранилищ по спутниковым данным. Рассматривались два участка – Рыбинское водохранилище и находящийся рядом участок леса. Для анализа использовались данные скатерометра AIRS. Результаты анализа показали изменение содержания метана над слабопроточным водохранилищем по сравнению с лесным участком с максимумом в августе и минимумом в мае. (Рис. 3)

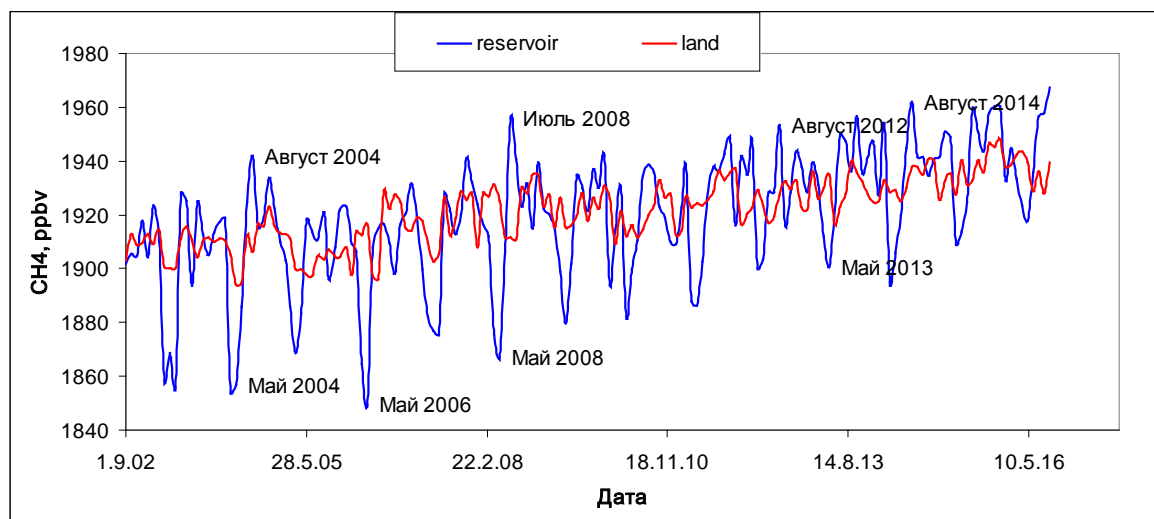


Рис. 3 - Концентрация метана в слое 1-4 км по данным скаттерометра AIRS в районе Рыбинского водохранилища

Данные дистанционного зондирования также применяются для исследования термического режима поверхности водохранилищ, динамики береговых зон, характеристик ледообразования и снегонакопления.

Исследования показали, что газовый режим также является важным показателем экологического состояния водных экосистем. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-РГО 17-05-41095 и РФФИ 18-05-00715.

Литература:

1. Williamson C.E., Saros J.E., Vincent W.F., Smold J.P. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change// *Limnology and Oceanography*. 2009. V. 54(6part2). P.2273-2282.
2. Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M. Gas Emissions: Fluxes and Processes Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments // *Environmental Science Series*. New York: Springer, 2005. - 732p.
3. Henderson-Sellers B. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review // *Reviews of Geophysics*. 1986. V. 24(3). P.625-649.
4. Надеждина Е.Д., Мацак В.И., Семиошина А.А., Школьник И.М. Модельные оценки параметров туманов на побережье водоемов Сибири // *Метеорология и гидрология*. 2010. №9. С. 20-28.
5. Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective // *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 2006. V. 13. P. 1381–1386.
6. Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate // *Bioscience*. 2000. V. 50. P. 766–775.
7. Гавриловский Д.В. Экологические проблемы Цимлянского водохранилища // *Новая наука: Теоретический и практический взгляд*. 2015, № 6-2. С. 17-19.
8. Roehm C., Tremblay A. Role of turbins in the carbon dioxide emissions from two boreal reservoirs, Quebec, Canada // *Journal of Geophysical Reseach*. 2006. V. 11. D24101.

**ENERGY AND GAS AIR-SURFACE EXCHANGE FOR PLAINS RESERVOIRS
FROM DATA ON SPECIALIZED EXPERIMENTS, MODELING AND REMOTE
SENSING**

Repina I.A.^{1,2}, Grechushnikova M.G.², Stepanenko V.M.²,
Varentsov M.I.^{2,1}, Artamonov A.Yu.¹

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow

²Lomonosov Moscow State University, Moscow

E-mail: repina@ifaran.ru

The report presents the results of experimental and theoretical studies of the interaction of the atmosphere and the surface on the example of two reservoirs: Mozhaisk and Gorky. The results of all-season experimental studies of gas, energy, hydrological, and biogeochemical characteristics make it possible to identify periods of greenhouse gas emissions and its relationship to meteorological and hydrological conditions. To study the biogeochemical regime of reservoirs, the LAKE reservoir model is used. Remote sensing data are used to study the thermal regime of the surface of reservoirs, the dynamics of coastal zones, the characteristics of ice formation and snow accumulation.

Keywords: lowland reservoirs, methane emission, sensible and latent heat fluxes, remote sensing