УДК 551.511.61

ОБЛАСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКА СТАНЦИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ НА МЕЛКОВОДЬЕ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Никитин О.В.[1], кандидат географических наук, доцент, ведущий аналитик данных;
Степанова Н.Ю.[2], доктор биологических наук, профессор;
Аухадеев Т.Р.[2], кандидат географических наук, доцент;
Латыпова В.З.[2], доктор химических наук, профессор
[1]ООО «Экоаудит»
(г. Москва, Российская Федерация)
[2]Казанский (Приволжский) федеральный университет
(г. Казань, Российская Федерация)

Аннотация: по данным станции турбулентных пульсаций на мелководье Куйбышевского водохранилища (август–сентябрь 2024 г.) рассчитан футпринт: 90 % потока формируется в пределах 150 м, вклад суши около 2 %.
Ключевые слова: метод турбулентных пульсаций, футпринт, область формирования потока, FFP, метан, CH_4, Куйбышевское водохранилище, карбоновый полигон, плавучие камеры.

FLUX FOOTPRINT OF AN EDDY COVARIANCE STATION IN THE SHALLOW ZONE OF THE KUIBYSHEV RESERVOIR

Nikitin O.V.[1], Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Lead Data Analyst;
Stepanova N.Yu.[2], Doctor of Biological Sciences, Professor;
Aukhadeev T.R.[2], Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor;
Latypova V.Z.[2], Doctor of Chemical Sciences, Professor
[1]Ekoaudit LLC (Moscow, Russian Federation)
[2]Kazan (Volga Region) Federal University (Kazan, Russian Federation)

Annotation: the flux footprint of an eddy covariance station in the shallow zone of the Kuibyshev Reservoir was estimated for August–September 2024: 90 % of the flux originates within 150 m; land contributes about 2 %.
Keywords: eddy covariance, flux footprint, source area, FFP, methane, CH_4, Kuibyshev Reservoir, carbon measurement supersite, floating chambers.

Метод турбулентных пульсаций (англ. eddy covariance, EC) позволяет непрерывно измерять потоки метана (CH_4) и диоксида углерода между водной поверхностью и атмосферой. Измеренный поток относится не к точке, а к участку поверхности с наветренной стороны от датчика – области формирования потока, или футпринту (англ. footprint). Её размеры зависят от высоты измерения, скорости ветра, турбулентности и стратификации и меняются от одного интервала осреднения к другому. Для станций на водоёмах вблизи берега это особенно важно: часть сигнала может формироваться над сушей, а прямое сравнение EC с камерными измерениями корректно, лишь когда камеры попадают в область вклада. Цель работы – оценить футпринт станции EC на водном участке карбонового полигона «Карбон-Поволжье» в августе–сентябре 2024 г. и сопоставить его с размещением плавучих камер.

Объект и методы. Станция установлена на заякоренном понтоне на мелководье (глубины 2–4 м) Саралинского участка Куйбышевского водохранилища (55,2694° с.ш., 49,2802° в.д.); датчики расположены на высоте около 2 м над водой, плавучая платформа сохраняет эту высоту при колебаниях уровня [2]. С севера участок ограничен берегом, с востока и юга – серповидным островом. Потоки за 30-минутные интервалы осреднения

рассчитаны в EddyPro [2]. Двумерный футпринт оценивали для каждого интервала по параметризации FFP [1] по скорости и направлению ветра, скорости трения u*, длине Монина–Обухова L и дисперсии поперечной компоненты ветра; высота измерения 2,0 м восстановлена из выходных данных EddyPro, высота пограничного слоя в неустойчивых условиях принята 1000 м. Исключали интервалы вне области применимости модели ($u^* < 0{,}1$ м/с, $z/L < -15{,}5$, $z \le 20 \cdot z_0$, где z_0 – параметр шероховатости). День и ночь разделяли по высоте Солнца. Расчёты выполнены в программном модуле EC Flux Explorer среды прикладных программ «ГЕОСФЕРА-ИНТЕГРА» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688757); реализация FFP проверена по аналитическим свойствам параметризации и по независимому коду. Розы ветров построены по данным станции ЕС программой CLIMATERA: WIND (свидетельство № 2024614325). Контур суши оцифрован по спутниковому снимку с привязкой к координатной сетке (COSMOCOMPOSIT, свидетельство № 2023685316). Потоки CH_4 по плавучим камерам взяты из опубликованных данных [3] (станция 1, 20.08.2024 и 27.09.2024), координаты точек – из полевых журналов; для каждой точки оценивали долю футпринта в круге радиусом 10 м вокруг неё за время экспозиций, а также за те же сутки ±1 день.

Результаты. Пригодными для расчёта оказались 878 интервалов в августе и 899 – в сентябре (табл. 1). В августе преобладал ветер северных румбов (С–ССЗ–СЗ, около половины случаев), в сентябре, наряду с северным, – юго-западный (рис. 1, а, б). Из-за малой высоты измерения основной вклад формируется рядом с мачтой: максимум приходится на 9 м, половина сигнала – на первые 23–24 м, 90 % – на 142–149 м против ветра. Область, дающая 90 % вклада за месяц, занимает 3,8–4,7 га и почти целиком лежит над акваторией полигона. Доля суши и острова в футпринте составила в среднем около 2 %, не более 7,3 % в отдельные интервалы; наибольшей она была при юго-восточном ветре, со стороны острова. Это согласуется с модельной оценкой, выполненной до установки станции [4], по которой сигнал формируется преимущественно водной поверхностью. Размеры футпринта днём и ночью практически не различались (расстояние 90 % вклада – 141 и 143 м в августе, 149 и 150 м в сентябре): над тёплой водой доля интервалов с устойчивой стратификацией ($z/L > 0$) ночью не превышала дневную (12 и 22 % в августе, 36 и 35 % в сентябре), поэтому суточный ход сказывается в первую очередь на направлении и скорости ветра, а не на протяжённости области вклада.

Таблица 1

Характеристики футпринта (медианы по пригодным интервалам осреднения)

Показатель	Август 2024	Сентябрь 2024
Пригодных интервалов (30 мин)	878	899
Скорость ветра, м/с	2,65	2,51
Скорость трения u*, м/с	0,21	0,19
Расстояние максимума вклада, м	8,8	9,3
Расстояние 50 / 80 / 90 % вклада, м	23 / 68 / 142	24 / 71 / 149
Площадь области 50 / 80 / 90 % вклада, га	0,16 / 1,15 / 3,79	0,20 / 1,41 / 4,63
Доля суши: медиана (максимум), %	2,0 (7,3)	2,2 (7,3)

Плавучие камеры 20 августа 2024 г. стояли на разрезе от мачты к северу и северо-западу (40–220 м), экспозиции – 12:27–16:08. Ветер в это время был западным и западо-северо-западным (267–310°), и футпринт лежал к западу от мачты (рис. 1, в): доля футпринта в круге 10 м вокруг любой из точек камер не превышала 0,2 %, то есть камеры и ЕС характеризовали разные участки акватории. В соседние сутки (19–21.08) при северо-северо-западном ветре днём и ночью в область 90 % вклада попадали бы точки 2–3. 27 сентября 2024 г. при юго-юго-западном ветре (207–211°) три камеры в 15–45 м к юго-западу от мачты оказались внутри области вклада (5–14 % сигнала в круге 10 м вокруг каждой; рис. 1, г); тот же ветер держался 26–28.09, и днём, и ночью.

И камеры, и ЕС дают оценку одной величины – среднего потока с акватории мелководья водохранилища, только с разным пространственным и временным осреднением.

Если поток в пределах бухты считать относительно однородным, допустимо сравнивать средние значения: за время экспозиций ЕС дал 41,8 (24–71; n = 9) и 26,6 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$ (n = 2), камеры – 21,1 ± 13,8 (медиана 15,0; n = 10) и 18,4 ± 9,7 (медиана 18,3; n = 8) [3], то есть величины одного порядка при более высоких значениях ЕС. Ряды малы, поэтому сопоставление иллюстративное. Расчёт футпринта для каждого интервала показывает, какие сопоставления прямые, а какие опираются на допущение об однородности, и позволяет отбирать интервалы для экстраполяции.

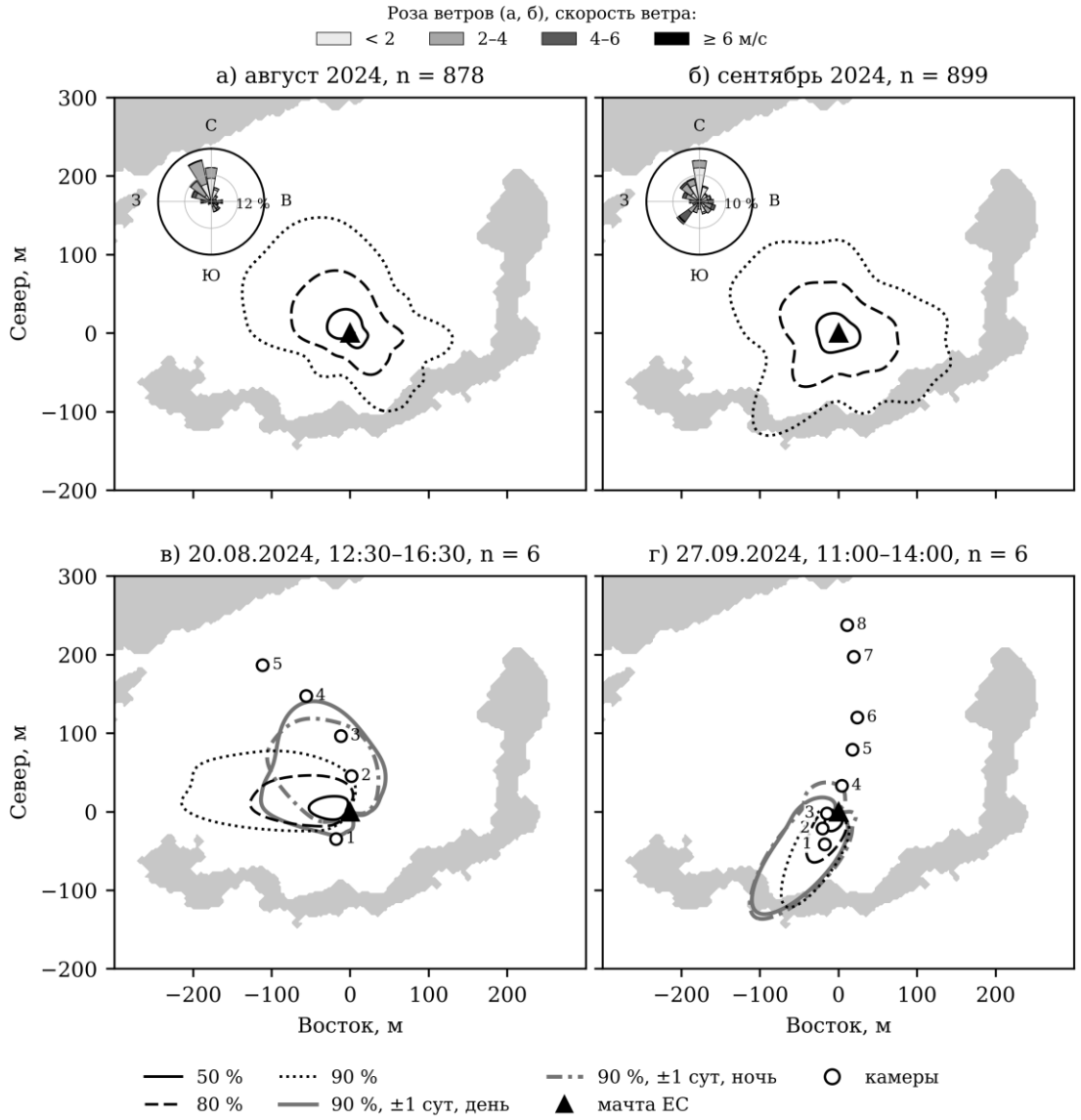


Рисунок 1 – Футпринт станции: а, б – области 50, 80 и 90 % вклада за август и сентябрь 2024 г. и розы ветров (повторяемость направлений, %, по градациям скорости); в, г – то же за время экспозиций плавучих камер 20.08 и 27.09.2024 и области 90 % вклада за те же сутки ±1 день днём и ночью; n – число интервалов осреднения; серым – суша и острова; цифры – номера точек камер

Заключение. Для станции ЕС высотой 2 м на мелководье Куйбышевского водохранилища 90 % измеряемого потока в августе–сентябре 2024 г. формировалось в пределах 142–149 м, вклад суши не превышал 7,3 %, а размеры области вклада днём и ночью были близки: измеренные потоки характеризуют водную поверхность карбонового полигона. Расчёт футпринта для каждого интервала позволяет отбирать интервалы, в которых камеры находятся в области вклада, и разделять прямые сопоставления камерного метода и метода турбулентных пульсаций и сравнения средних по акватории.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Литература:

1. Kljun N., Calanca P., Rotach M.W., Schmid H.P. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP) // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8. P. 3695–3713. DOI: 10.5194/gmd-8-3695-2015.

2. Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Aukhadeev T.R., Latypova V.Z. Greenhouse gas fluxes (CH_4, CO_2) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study // Limnology and Freshwater Biology. 2025. No. 4. P. 995–1012. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-995.

3. Никитин О.В., Степанова Н.Ю., Новикова Л.В., Гордеев А.С., Кузьмин Р.С., Латыпова В.З. Эмиссия метана в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища: исследование методом плавучих камер // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 76–93. DOI: 10.35567/1999-4508-2026-1-76-93.

4. Согачев А.Ф., Репина И.А., Кожевникова М.В., Усманов Б.М., Прохоров В.Е. Оценка области воздействия на газообмен водоем–атмосфера в прибрежной зоне: на примере водного участка полигона «Карбон-Поволжье» // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Москва: Физматкнига, 2024. С. 197.