

РЕЦЕНЗИИ

УДК [551.510.41+551.510.522]:[547.211+556.56]:[631.433.3]

НОВОЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ CO₂ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ МИКРОВИХРЕВЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Глаголев М.В.

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Институт лесоведения РАН, пос. Успенское, Московская обл.
Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск*

m_glagolev@mail.ru

Цитирование: Глаголев М.В. 2013. Новое отечественное исследование потоков CO₂ в приземном слое атмосферы методом микровихревых пульсаций // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 4. № 1(7). EDCCbrv0004.

ВВЕДЕНИЕ

Болота и изучение цикла углерода

Для средних и высоких широт Северного полушария леса и болота являются доминирующими типами растительного покрова [Ваганов и др., 2005]. Болота и заболоченные земли – одни из наиболее широко представленных ландшафтов также и на территории Российской Федерации, составляющие весомую часть заболоченности как Евразии, так и планеты в целом. Благодаря уникальным свойствам, выраженным прежде всего в наличии торфяной залежи, они играют важную (нередко ключевую) роль в поддержании природных процессов на местном, региональном и глобальном уровнях, в регулировании круговорота воды, углерода и других природных компонентов [Вомперский и др., 2005].

Углеродный цикл занимает особое место в проводимых в настоящее время экологических и климатологических исследованиях, в частности потому, что именно соединения углерода, являясь основными химическими компонентами естественных и антропогенных выбросов, определяют «парниковый эффект» [Ваганов и др., 2005]. Торфяная залежь – важнейший резервуар долговременного стока атмосферного углерода, который смягчает «парниковый эффект». Она же является источником парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O), диапазон эмиссии которых изменяется на порядки в зависимости от природных характеристик, географического положения и степени трансформации человеком этих ландшафтов [Вомперский и др., 2005].

Для балансовых расчетов важно произвести точную оценку всех составляющих углеродного цикла, как в глобальном масштабе, так и для отдельных регионов. В связи с этим в настоящее время особое внимание должно уделяться методам количественного определения интенсивности дыхания почвы (ИДП). Камерный статический метод определения ИДП по накоплению CO₂ в камере-изоляторе, предложенный еще Люндегордтом (1924) имеет множество модификаций и является в настоящее время самым популярным. Большинство данных по оценке потоков CO₂ из почв различных экосистем, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, получены именно камерным методом. Но очевидными ограничениями при использовании этого метода являются¹ точечность (отсутствие непрерывности) проводимых измерений, малый размер пробных площадей и невозможность прямой оценки балансовых потоков в лесных и некоторых других типах экосистем. В солнечную погоду температура в камере в течение часа может подниматься на 10-15°C, что вносит значительные погрешности в измерения. В снежный и морозный период применение камерного метода также имеет

¹ Среди ограничений камерного метода Лопес де Гереню и др. [2005, с. 409] указывают еще и его «трудоемкость». Однако 20 строчками ранее они же пишут, что «Камерный статический метод... является... самым популярным... в силу своей простоты и удобства». Но простота и удобство несколько не вяжутся с трудоемкостью.

свои трудности. В частности, при нарушении снежного покрова происходит мгновенный выброс углекислого газа, а затем нарушенный снег начинает активно сорбировать CO₂, выделяющийся из почв, занижая реальную скорость эмиссии [Лопес де Гереню и др., 2005, с. 410].

Со второй половины 90-х гг. и за рубежом, и в России (в рамках международных проектов) для количественной оценки потоков CO₂ в экосистемах все чаще используется микрометеорологический метод eddy-covariance, позволяющий сразу оценивать величину углеродного обмена экосистемы в целом. Этот способ измерения потоков парниковых газов при длительных стационарных наблюдениях обладает рядом несомненных достоинств, кои суть: непрерывность получения данных, минимальное воздействие на изучаемый природный объект, значительный пространственный масштаб оцениваемого объекта. К недостаткам данного метода, сдерживающим его широкое распространение, следует отнести высокую стоимость оборудования [Лопес де Гереню и др., 2005, с. 411]. Поскольку, с одной стороны, в отечественной литературе трудно найти описание метода eddy-covariance (метода микровихревых пульсаций), а, с другой стороны, рассматриваемая в нашей рецензии диссертационная работа О.А. Михайлова в значительной степени выполнена именно этим методом, мы сочли необходимым привести краткую элементарную теорию метода eddy-covariance и некоторые подробности его технической реализации в Приложении.

Используемые сокращения

ИДП – интенсивность дыхания почвы;

ПЭП – пьезо-электрический преобразователь;

УЗА – ультразвуковой анемометр;

УП – удельный поток;

ФАР – фотосинтетически-активная радиация;

NEE – нетто-обмен диоксида углерода между болотом и атмосферой;

P_{gross} – гросс-фотосинтез;

R_{eco} – дыхание экосистемы;

$T_{пов}$ – температура поверхности почвы.

ДИССЕРТАЦИЯ О.А. МИХАЙЛОВА – ЗАМЕТНЫЙ ВКЛАД В ОТЕЧЕСТВЕННУЮ ЭКОЛОГИЮ

Целью диссертационной работы О.А. Михайлова [2013, с. 3] было выявление закономерностей суточной и сезонной динамики нетто-обмена углекислого газа в приземном слое атмосферы на мезо-олиготрофном болоте средней тайги.

Работа выполнялась в течение нескольких лет на мезо-олиготрофном болоте Медла-Пэв-Нюр, расположенном в Сыктывдинском районе Республики Коми (61° 56' с.ш., 56° 13' в.д.). При этом в исследования вовлекались три участка: олиготрофные сосново-кустарничково-пушицево-сфагновые сообщества, мезотрофные кустарничково-травяно-сфагновые сообщества и мезоевтрофная травяно-моховая проточная топь с кочковато-топяным микрорельефом [Михайлов, 2013, с. 6-7].

Было показано, что в условиях средней тайги на мезо-олиготрофном болоте в период вегетации эмиссия CO₂ в атмосферу преобладала над его поглощением в сформированных на кочках олиготрофных кустарничково-сфагновых сообществах. В мезотрофных фитоценозах с доминированием *Carex rostrata* и участием *Betula nana* в течение вегетации NEE > 0. Стабильно высокое поглощение CO₂ сохранялось в сфагновых сообществах мочажин олиготрофных и мезо-евтрофных участков болота [Михайлов, 2013, с. 20].

Ранней весной, после схода снега, эмиссия CO₂ с поверхности болота в течение суток преобладала над поглощением. Переключение на сток CO₂ в болотных сообществах отмечено в середине мая. Экстремальные значения NEE (-450 мкг·м⁻²·с⁻¹) наблюдали на мезо-евтрофном участке в первой декаде июля – в период максимального развития фотосинтезирующих органов растений. Осенью переход от стока к эмиссии отмечен в конце сентября. После формирования снежного покрова величина удельного потока CO₂ с поверхности болота составила 12 мкг·м⁻²·с⁻¹ [Михайлов, 2013, с. 20-21].

Установлена корреляционная зависимость параметров газообмена CO₂ между болотом и атмосферой от основных экологических факторов. Влияние температуры поверхности почвы на NEE

усиливалось весной, а значимость ФАР для данного процесса возрастала летом и осенью. Температура поверхности почвы положительно влияла на гросс-фотосинтез и дыхание экосистемы во все периоды наблюдений. Ранней весной (апрель) и поздней осенью (октябрь) – при низкой скорости фотоассимиляции CO₂ растениями – величина общего экосистемного обмена CO₂ на болоте соответствовала величине экосистемного дыхания [Михайлов, 2013, с. 21].

За вегетационный период величина NEE для исследованного болота, определенная динамическим камерным методом, составила -375 г·м⁻², а методом микровихревых пульсаций – -442.4 г·м⁻². Годовой баланс вертикальных потоков CO₂ в приземном слое атмосферы составил -213.5 г·м⁻². Полученные результаты свидетельствуют о положительной роли мезо-олиготрофного болота среднетаежной подзоны в поглощении атмосферного углерода [Михайлов, 2013, с. 21].

Особое значение, на наш взгляд, для отечественной экологии имеет то, что большинство вышеприведенных результатов получено современным методом микровихревых пульсаций, широко применяемым в мире, но пока почти не используемым в России.

Однако (при в целом положительной оценке работы О.А. Михайлова) считаем необходимым высказать некоторые критические замечания (к сожалению, нам довелось познакомиться лишь с текстом автореферата [Михайлов, 2013], а не самой диссертационной работы, так что, возможно, отмечаемые нами далее недостатки имеются только в автореферате, но не в основном тексте диссертации). Впрочем, прежде чем перейти к следующему разделу, где будут перечислены все наши замечания по недостаткам работы О.А. Михайлова, один из них, являющийся, по-видимому, продолжением достоинств этой работы, рассмотрим прямо сейчас.

Иногда заключения О.А. Михайлова несколько шире, чем можно было бы сформулировать, исходя строго из материалов работы. Например, проведя исследования только на трех (!) участках лишь одного (!!!) болота автор в разделе «Научная новизна» (с. 4 автореферата) заключает: «На основании выполненных исследований доказана гипотеза о положительной роли болот подзоны средней тайги в поглощении атмосферного углерода и поддержании углеродного пула биосферы». И далее (в разд. «Теоретическое и практическое значение»): «Теоретическая значимость исследования заключается в том, что доказана положительная роль болот среднетаежной подзоны в поддержании углеродного пула биосферы в таежной зоне». Конечно, даже из чисто логических соображений очевидно, что **доказать какую-либо гипотезу о болотах** целой природной подзоны **на основании изучения лишь одного болота**, площадь которого составляет менее 2800 га, невозможно. Но, хочется думать, что вышеприведенные утверждения О.А. Михайлова обусловлены не столько непониманием основ методологии науки, сколько тем, что талантливый молодой ученый, не может пока сдерживать кипение идей в строгих рамках экспериментальных данных. И возможно, читая диссертацию О.А. Михайлова, мы присутствуем при рождении нового дерзновенного эколога-теоретика, а не просто обычного «собиравателя экспериментальных фактов».

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

- 1) **Нередко автор использует несколько неудачные или неправильные термины.** Например, хотя через NEE (см. второй сверху абзац на с. 9 автореферата) он обозначает «нетто-обмен диоксида углерода между болотом и атмосферой», но для усредненной аналогичной величины, относимой лишь к светлому времени суток (NEE_{ср.день}), использует термин «средний *нетто-обмен* обмен диоксида углерода за светлое время суток» (см. второй снизу абзац на с. 9 автореферата). Примером **неправильно** используемого понятия является повсеместное употребление О.А. Михайловым термина «поток» тогда, когда речь идет о величинах, выраженных в мкг·м⁻²·с⁻¹, т.е. (если говорить более обще) – о массе, переносимой через единицу площади за единицу времени. Это не «поток», а «удельный поток», называемый еще «поверхностной плотностью потока». Впрочем, заметим, что авторы почти всех экологических публикаций вместо правильного физического термина «удельный поток» неправильно говорят просто о «потоке» (но с точки зрения физики, потоком массы называют массу, переносимую в единицу времени сквозь заданную поверхность [Филиппов, 1986, с. 6], а не через единицу поверхности; таким образом, единицами измерения потока газа будут, например, мг·час⁻¹ или мкг·с⁻¹). Наконец, не можем не отметить следующее утверждение (со с. 11

автореферата): «...в июне средняя величина NEE днем составляла -131.8 мкг м⁻²с⁻¹... В июле среднедневная величина NEE на этом участке снизилась до -122.9 мкг м⁻²с⁻¹...». Поскольку -122.9 > -131.8, то, с формально-математической (и с формально-логической) точки зрения, среднедневная величина NEE не снизилась, а возросла. Вероятно, О.А. Михайлов имел в виду то, что снизилось усвоение CO₂ данной экосистемой. Т.е. мы опять имеем неудачное (или, скорее, неправильное) использование терминологии.

- 2) **Форма представления материала не всегда удачна.** Например, на с. 17 автореферата читаем: «...самая тесная связь P_{gross} с температурой поверхности почвы установлена осенью (рис. 5)». Однако, думается, что почти любой, кто видел рис. 5 в автореферате согласится, что «на глаз» из него нельзя понять – какой же из наборов экспериментальных данных («апрельский», «июльский» или «октябрьский») демонстрирует наиболее тесную связь P_{gross} с температурой почвы (ибо в каждом случае разброс довольно большой). Раз речь идет о тесноте связи, то следовало дать какую-либо количественную характеристику ее, например – коэффициент детерминации. И еще один пример. На с. 19 автореферата читаем: «Сезонный ход интенсивности CO₂ – газообмена... можно условно разделить на три основных периода (рис. 7). Первый продолжался с 15 мая до 17 июля, когда наблюдали постепенное увеличение поглощения CO₂ болотной растительностью в дневное время суток. Второй – с 18 июля до 28 августа – характеризовался постепенным снижением NEE²... Третий период начинался с 29 августа, когда наблюдали резкое уменьшение поглощения CO₂... В конце сентября – начале октября суточный баланс диоксида углерода стал отрицательным³». Думается, что почти любой, кто видел рис. 7 в автореферате согласится, что «на глаз» из него нельзя понять – был ли в конце сентября суточный баланс CO₂ отрицательным или положительным. Раз речь идет о том, возрастает или убывает некоторая величина, отрицательна она или положительна, то, вероятно, следовало для нее кроме исходных экспериментальных данных (представляющих в данном случае весьма размытое облако точек⁴) дать усредненную (сглаженную) кривую.
- 3) **В автореферате сравниваются величины, не снабженные какими-либо характеристиками разброса или погрешности. Этого делать не следует.** Например, в 1-ом абзаце на с. 15 читаем: «Ночная эмиссия CO₂ в течение лета также возрастала, ее скорость достигала в июне 96.8, в июле 121.8 мкг м⁻² с⁻¹, а в августе начинала снижаться». Но нельзя говорить о возрастании от 96.8 к 121.8 если не заданы погрешности этих величин. Действительно, если в июне было, например, 96.8 ± 9.8, а в июле стало 121.8 ± 1.2, то, конечно, возрастание имеет место. А если было 96.8 ± 19.8, а стало 121.8 ± 21.2, то, безусловно ни о каком возрастании говорить нельзя – ситуация неопределенная: ведь истинными значениями, скрывающимися под «96.8 ± 19.8» и «121.8 ± 21.2», могли быть, например, 105 и 101, соответственно, но тогда имело место не возрастание, а убывание.
- 4) Кстати, на примере только что процитированного предложения проиллюстрируем еще одно замечание: **высказываемые О.А. Михайловым положения не всегда строго логичны.** Действительно, в рассмотренном выше примере сначала заявляется, что эмиссия CO₂ в течение лета возрастала, и вдруг дается противопоставление – «а в августе начинала снижаться». Но ведь август – часть лета! И раз в августе эмиссия снижалась, то логически неправильно говорить, что в течение лета она возрастала. Впрочем, подобные погрешности обычно оказывается возможным исправить введением буквально одного слова. Например, так было бы правильно: «Ночная эмиссия CO₂ в течение лета также *сначала* возрастала (ее скорость достигала в июне 96.8, в июле 121.8 мкг м⁻² с⁻¹), а в августе начинала снижаться». Не можем в этом пункте наших замечаний не отметить удивительную фразу (со с. 6 автореферата): «Суммарная величина нетто-обмена диоксида углерода между болотом и атмосферой зависит от ряда факторов, в том числе от методов измерения CO₂ –

² Опять же не «снижением», а возрастанием (аналогично сказанному в п. 1)!

³ Говоря, что баланс CO₂ стал *отрицательным*, О.А. Михайлов, как обычно, имеет в виду, что величина NEE стала *положительной*.

⁴ «Длина» которого в данном случае лишь примерно в 2 раза превышает «ширину».

газообмена». Все-таки, под суммарной величиной нетто-обмена логичнее понимать реально существующее в природе значение. И оно, конечно, не зависит от методов измерений. От них зависит *погрешность измерения* суммарной величины нетто-обмена.

- 5) К этому же замечанию примыкает и пример несколько иного рода. ***Иногда О.А. Михайлов подчеркивает какие-то очевидные вещи, причем таким образом, что создается впечатление некоторого существенного противопоставления*** (понятно, что это не приводит к каким-либо ошибкам; т.е. данное замечание относится лишь к стилю изложения). Например, на с. 14 читаем: «В апреле... наблюдали значительные колебания величины NEE в течение суток, что связано с возобновлением после зимы процессов дыхания и фотосинтеза у растений... Ночью, несмотря на понижение температуры воздуха, скорость выделения диоксида углерода с поверхности болота возрастала...». Как видим, совершенно тривиальное наблюдение того, что ночью УП CO₂ возрастает (что должно иметь место, кстати, вовсе не только в апреле), здесь как бы связывается с понижением температуры воздуха, и ночное повышение эмиссии CO₂ зачем-то противопоставляется понижению температуры. Но на самом деле это повышение обусловлено просто тем, что днем одновременно идут разнонаправленные процессы – фотосинтез (потребление CO₂) и дыхание (выделение CO₂), а ночью (из-за отсутствия света) фотосинтез не происходит. Т.е. главным управляющим фактором внешней среды в этом случае является свет, а вовсе не температура.
- 6) Хотя работа О.А. Михайлова в целом стоит на позициях современной строгой биофизической экологии, к сожалению, местами, забывая о необходимости количественной проверки каждого предположения, автор приводит весьма наивные положения. В качестве примера отметим следующее утверждение в 1-ом абзаце на с. 13: «Дополнительным источником CO₂... может быть окисление метана метанотрофными организмами... Вероятно, поэтому осушение на верховых болотах приводит к усилению эмиссии диоксида углерода в два-три раза (Александров и др., 1994)⁵». Хотим разочаровать автора: это маловероятно. Безусловно, окисление метана метанотрофными организмами является дополнительным источником CO₂. И осушение на болотах действительно приводит к существенному усилению эмиссии диоксида углерода. Но вот ***обеспечить двух-, а тем более трехкратное увеличение эмиссии CO₂ метанотрофия может разве что в отдельных уникальных случаях!*** На основании анализа литературных источников, содержащих многочисленные результаты измерений эмиссии метана из почв всего мира, Смагин и др. [2003] показали, что характерным значением удельного потока является величина около 2.3 мгС·м⁻²·час⁻¹. В [Glagolev, 1998] на основе анализа экспериментальных результатов из 11 публикаций была получена характерная величина доли окисленного метана. Она очень слабо изменилась при дальнейшем вовлечении в анализ еще и результатов из [Happell and Chanton., 1993; King, 1990; Magonigal and Schlesinger, 2002], а также результатов собственных исследований (опубликованных в [Glagolev et al., 2000]) и составила в конечном итоге 0.63. Итак, исходя из вышесказанного, получаем, что если даже весь образующийся метан будет окисляться, то характерная величина эмиссии, обусловленная этим дополнительным источником составит лишь 2.3/(1-0.63) = 6.2 мгС·м⁻²·час⁻¹. Но удельные потоки CO₂ на осушенных болотах обычно составляют, по крайней мере, на порядок (а то и на два порядка) большие значения – см., например, [Икконен, 2003; Глаголев с соавт., 2008].
- 7) ***Часто О.А. Михайлов выбирает неудачные*** (на наш взгляд) ***регрессионные зависимости для описания влияния факторов внешней среды***. Например, на рис. 4 (см. с. 16 автореферата; впрочем все нижесказанное будет касаться и рис. 5, где дана логарифмическая зависимость P_{gross} от $T_{пов}$) приведены уравнения вида $NEE = a - b \cdot \lg(\Phi AP)$. Очевидно, что при очень малых величинах ФАР согласно этой формуле будем иметь нереально большие значения NEE, а при ФАР = 0 вообще получим $NEE = \infty$. Справедливости ради отметим, что в том диапазоне ФАР, в котором автор

⁵ Располагая лишь авторефератом, мы не имеем возможности проверить – что конкретно утверждали Александров и др. в 1994 г. Но, в любом случае, даже если процитированное удивительное утверждение (о том, что причиной усиления эмиссии CO₂ в **два-три раза** на верховых болотах после осушения является метанотрофия) принадлежит Александрову и др., то, приводя это утверждение в своем автореферате без какой-либо критики, О.А. Михайлов теперь частично несет ответственность за данную нелепость.

использует свои формулы, никаких нереалистичных значений NEE не наблюдается, так что эти формулы в данной конкретной работе к ошибкам не приводят. Но, конечно, если бы использовались не чисто эмпирические логарифмические зависимости, а более физически обоснованные уравнения, то они нигде не приводили бы к бесконечностям. Такие «физичные» формулы могли бы смело использоваться в различных математических моделях (для предсказания поведения экосистем при любых освещенностях), а не только для проведения красивых линий через облако экспериментальных точек, как это имеет место в автореферате.

- 8) **В измерениях О.А. Михайлова величина Q_{10} противоречит общепринятым представлениям кинетики.** Действительно, в последнем (перед рис. 5) абзаце на с. 17 автореферата читаем: «В летний период увеличение $T_{\text{пов}}$ от +14 до +19 °С приводило к усилению дыхания в семь раз». Но из химической кинетики известно, что при повышении температуры на 10 градусов скорость реакции возрастает в $Q_{10} = 3 \pm 1$ раза [Панченков и Лебедев, 1985]. Заметим, что в измерениях О.А. Михайлова речь идет не о Q_{10} , а о несколько иной величине, которую, по аналогии, можно было бы обозначить Q_5 . Впрочем, она однозначно связана с Q_{10} простой квадратичной зависимостью⁶: $Q_{10} = (Q_5)^2$. Следовательно, у О.А. Михайлова $Q_{10} = 7^2 = 49$. Безумно большая величина! Она совершенно невозможна с точки зрения химической кинетики!!! Однако, поскольку в литературе часто встречаются такие и даже значительно более высокие величины Q_{10} , якобы наблюдавшиеся при изучении биологических процессов (в частности, повышенные величины Q_{10} для дыхания некоторых почв привел А.В. Наумов [2009, с. 55-57, 62, 127]), это не могло не сподвигнуть наиболее пытливых исследователей дать исчерпывающие объяснения данному феномену. Три самых известных объяснения⁷ суммированы нами в [Глаголев и Филиппов, 2011] – см. там разд. «Как могут возникнуть завышенные значения Q_{10} ?». Поэтому здесь мы не будем эти объяснения повторять (отсылая интересующегося читателя к цитированной выше нашей статье), но, тем не менее, укажем, что все они позволяют истинной величине Q_{10} (т.е. отношению скоростей химической реакции при температурах, отличающихся на 10 °С) всегда находиться в границах примерно от 2 до 4, тогда как кажущаяся величина Q_{10} может принимать практически любые значения (по крайней мере, она может не только принимать значение, полученное О.А. Михайловым, но быть даже на 1 или 2 порядка больше). Казалось бы – ну и что? Но дело в том, что скорость *дыхания*, как химического (биохимического) процесса не возрастает в 7 раз, в противоположность тому, что утверждает О.А. Михайлов. А вот *эмиссия*, складывающаяся не только из дыхания, но и из других процессов (в частности, чисто физических – дегазации раствора при нагревании, десорбции CO₂ с почвенных частиц), действительно может возрасти в 7 раз.

ВЫВОД

Следует отметить, что приведенные выше недостатки автореферата не оказывают существенного влияния на научную ценность диссертационной работы О.А. Михайлова. Предпринятое им исследование

⁶ Выведем общую формулу, связывающую любые величины Q_{10-a} и Q_{10-b} . Пусть зависимость скорости реакции (v) от температуры (T) задается уравнением $v(T) = v_0 \cdot \exp(k \cdot T)$, где v_0 и k – некоторые константы. Тогда $Q_{10-a} = v(T+10-a)/v(T) = \exp(k \cdot [T+10-a]) / \exp(k \cdot T) = \exp(k \cdot [10-a])$. Аналогично, $Q_{10-b} = \exp(k \cdot [10-b])$. Выразим k из последнего равенства: $(10-b)^{-1} \cdot \ln(Q_{10-b}) = k$. И подставим результат в предпоследнее равенство, т.е. в $Q_{10-a} = \exp(k \cdot [10-a]) \Rightarrow Q_{10-a} = \exp(\ln[Q_{10-b}] \cdot [10-a] / [10-b]) = \exp(\ln[Q_{10-b}]^{(10-a)/(10-b)}) = Q_{10-b}^{(10-a)/(10-b)}$. Например, для интересующего нас частного случая перехода от Q_5 к Q_{10} следует выбрать $a = 0$ и $b = 5$. Тогда имеем: $Q_{10-0} = Q_{10-5}^{(10-0)/(10-5)} \Rightarrow Q_{10} = (Q_5)^2$.

⁷ Кроме них в данном конкретном случае мы можем дать еще одно – чисто статистическое. К сожалению, как мы уже указывали в наших замечаниях выше, О.А. Михайлов почти нигде в автореферате не приводит какие-либо характеристики разброса или погрешности обсуждаемых им величин. Наше «статистическое» объяснение состоит в том, что значение $Q_5 = 7$ было получено с весьма существенной погрешностью, и если бы автор указал ее, то, вполне возможно, относительная погрешность оказалась бы не менее 43%, а этого вполне достаточно, чтобы истинное значение $Q_5 = 4$. Можем ли мы оценить реалистичность нашего предположения? В автореферате не выделены исходные данные по R_{eco} на основании которых получено значение $Q_5 = 7$. Но если качество их примерно такое же, как данных по R_{eco} на рис. 6 (см. с. 18 автореферата), то очевидно, что погрешность определения Q_5 огромна и вышеприведенное «статистическое объяснение» вполне реалистично.

выполнено на высоком научно-методическом уровне, основные положения и выводы диссертации обоснованы и подкреплены фактическим материалом.

Несмотря на перечисленные выше мелкие и мельчайшие замечания, работа О.А. Михайлова является весомым вкладом в отечественную экологию и заслуживает самой высокой оценки. Образно можно сказать, что диссертационная работа О.А. Михайлова – одна из самых ярких жемчужин в и без того прекрасном ожерелье диссертационных работ, выполненных в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен д.б.н. А.А. Сирину (Институт лесоведения РАН) и О.А. Михайлову (Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН) обративших его внимание на рассмотренную здесь интересную диссертацию. Кроме того, хотелось бы выразить искреннюю благодарность студенту факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Д.В. Ильясову за плодотворное обсуждение автореферата вышеуказанной диссертации.

ЛИТЕРАТУРА

- Ваганов В.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. 2005. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журнал. №4. С. 631-649.
- Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. 2005. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия РАН. Серия географическая. № 5. С. 39-50.
- Выгодская Н.Н., Курбатова Ю.А., Варлагин А.В., Милюкова И.М., Козлов Д.Н., Татаринов Ф.А. 2003. Потоки CO₂ между атмосферой и бореальными экосистемами южной европейской тайги // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пушино. С. 29-30.
- Глаголев М.В. 2010. К методу «обратной задачи» для определения поверхностной плотности потока газа из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 1. № 1. С. 17-36. Также доступна по URL (дата обращения: 30.07.2010): http://www.ugrasu.ru/uploads/files/EDCC_1_1_Glagolev.pdf
- Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. 2010. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва-атмосфера. Томск: Изд-во ТГПУ. 104 с.
- Глаголев М.В., Филиппов И.В. 2011. Инвентаризации поглощения метана почвами // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 2(4). EDCCrev0002. Также доступна по URL (дата обращения 12.05.2013): http://www.ugrasu.ru/uploads/files/EDCC_2_2_Glagolev.pdf.
- Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. № 5. С. 46-58.
- Горбенко Ю.А., Крышев И.И. 1985. Статистический анализ динамики морской экосистемы микроорганизмов. Киев: Наукова думка. 144 с.
- Иконен Е.Н. 2003. Гидротермические зависимости продуцирования CO₂ в сфагновых торфах // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003 г.: Тезисы докладов. Пушино. С. 54.
- Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Замолотчиков Д.Г., Кудеяров В.Н. 2005. Методы количественной оценки потоков диоксида углерода из почв // Методы исследования органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТИОУ. С. 408-425.
- Минаева Т.Ю., Курбатова Ю.А., Татаринов Ф.А., Русанович Н.Р. 2003. Сезонная динамика растительности как фактор формирования газообмена CO₂ между поверхностью и атмосферой на верховом болоте // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пушино. С. 80-81.
- Михайлов О.А. 2013. Сезонная динамика вертикальных потоков CO₂ в приземном слое атмосферы на мезо-олиготрофном болоте средней тайги: Автореферат дис. ... к-та биол. наук. Сыктывкар: Ин-т био. КНЦ УО РАН.
- Наумов А.В. 2009. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 208 с.
- Панченков Г., Лебедев В. 1985. Химическая кинетика и катализ. М.: Химия. 592 с.
- Смагин А.В., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Шнырев Н.А. 2003. Методы исследования потоков газов и состава почвенного воздуха в полевых условиях с использованием портативного газоанализатора ПГА-7 // Вестник МГУ, сер. Почвоведение. №3. С. 29-36.
- Филиппов Л.П. 1986. Явления переноса. М.: Изд-во МГУ. 120 с.
- Belelli Marchesini L., Papale D., Reichstein M., Vuichard N., Tchebakova N., Valentini R. 2007. Carbon balance assessment of a natural steppe of southern Siberia by multiple constraint approach // Biogeosciences. V. 4. P. 581-595. URL: www.biogeosciences.net/4/581/2007/

Etzold S., Buchmann N., Eugster W. 2010. Contribution of advection to the carbon budget measured by eddy covariance at a steep mountain slope forest in Switzerland // *Biogeosciences*. V. 7. P. 2461-2475. DOI:10.5194/bg-7-2461-2010. URL: www.biogeosciences.net/7/2461/2010/

Eugster W., Zeyer K., Zeeman M., Michna P., Zingg A., Buchmann N., Emmenegger L. 2007. Methodical study of nitrous oxide eddy covariance measurements using quantum cascade laser spectrometry over a Swiss forest // *Biogeosciences*. V. 4. P. 927-939. URL: www.biogeosciences.net/4/927/2007/

Fan S.M., Wofsy S.C., Bakwin P.S., Jacob D.J., Anderson S.M., Keibian P.L., McManus J.B., Kolb C.E. 1992. Micrometeorological Measurements of CH₄ and CO₂ Exchange Between the Atmosphere and Subarctic Tundra // *Journal of Geophysical Research*. V. 97. No. D15. P. 16627-16643.

Fox A.M., Huntley B., Lloyd C.R., Williams M., Baxter R. 2008. Net ecosystem exchange over heterogeneous Arctic tundra: Scaling between chamber and eddy covariance measurements // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 22. GB2027. doi:10.1029/2007GB003027

Glagolev M.V. 1998. Modeling of Production, Oxidation and Transportation Processes of Methane // *Global Environment Research Fund: Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 1997*. Tokyo: Environment Agency. Global Environment Department. Research & Information Office. P. 79-111.

Glagolev M., Uchiyama H., Lebedev V., Utsumi M., Smagin A., Glagoleva O., Erohin V., Olenev P., Nozhevnikova A. 2000. Oxidation and Plant-Mediated Transport of Methane in West Siberian Bog // *Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999*. Tsukuba: Isebu. P. 143-149.

Happell J.D., Chanton J.P. 1993. Carbon Remineralization in a North Florida Swamp Forest: Effects of Water Level on the Pathways and Rates of Soil Organic Matter Decomposition // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 7. P. 475-490.

Harazono Y., Mano M., Yoshimoto M., Vourlitis G.L., Oechel W.C. 1998. CO₂ Budget of the Wet Sedge Tundra Ecosystems in Alaska, analyzed by Continuous Flux Measurements and a Tundra CO₂ Budget Model (TCBM) // *Proceedings of the Sixth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997*. Tsukuba: Isebu. P. 159-174.

Inoue G., Makshyutov S. 1994. Application of Conditional Sampling Eddy Flux Measurement in West Siberia Lowland // *Proceedings of the Second Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1993*. Tsukuba: Isebu. P. 83-85.

Inoue G., Makshyutov S., Yazawa K., Tamaru T., Inokuchi H., Shirai M., Nakamura M., Terui Y. 1997. Eddy-Correlation Technique Applied to CO₂ and Water Vapor Flux Measurements over Hokkaido in July 1996 // *Proceedings of the Fifth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1996*. Tsukuba: Isebu. P. 15-19.

King G.M. 1990. Regulation by light of methane emissions from a wetland // *Nature*. V. 345. P. 513-515.

Machimura T., Iwahana G., Fukuda M., Chambers S.D., Fedorov A.N. 2000. Energy and CO₂ Budgets over Burnt and Unburned Larch Forests in East Siberia // *Proceedings of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999*. Tsukuba: Isebu. P. 165-170.

Megonigal J.P., Schlesinger W.H. 2002. Methane-limited methanotrophy in tidal freshwater swamps // *Global Biogeochem. Cycles*. V. 16. N. 4. P. 1088. DOI:10.1029/2001GB001594.

Moncrief J., Valentini R., Greco S., Seufert G., Ciccioli P. 1997. Trace gas exchange over terrestrial ecosystems: methods and perspectives in micrometeorology // *Journal of Experimental Botany*. V. 48. No. 310. P. 1133-1142.

Ritter J.A., Barrick J.D.W., Sachse G.W., Gregory G.L., Woerner M.A., Watson C.E., Hill G.F., Collins L.E., Jr. 1992. Airborne Flux Measurements of Trace Species in an Arctic Boundary Layer // *Journal of Geophysical Research*. V. 97. P. 16601-16625.

Shimoyama K., Inoue G., Nakano T. 1999. Seasonal variation in heat budget in the west Siberian wetland - Observation results from April to July in 1998 // *Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998*. Tsukuba: Isebu. P. 168-174.

Yazawa K., Tamaru T., Inokuchi H., Shirai M., Nakamura M., Terui Y., Inagaki T., Inoue G., Machida G., Makshyutov S. 1997. Research on Upgrading the Measuring Method of the Global Warming Gases by Aircraft // *Proceedings of the Fifth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1996*. Tsukuba: Isebu. P. 20-27.

Yazawa K., Tamaru T., Nakamura M., Terui Y., Shirai M., Inoue H., Machida T. 1995. Aircraft measurement of CO₂ and development of an ultrasonic anemometer // *Proceedings of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994*. Sapporo: iWORD. P. 65-72.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Элементарная теория метода микровихревых пульсаций

В отечественной литературе метод «eddy covariance» («eddy correlation») иногда обозначается терминами «метод микровихревых пульсаций» [Михайлов, 2013], «метод пульсационных измерений» [Выгодская и др., 2003; Минаева и др., 2003; Глаголев, 2010] или «метод турбулентной ковариации» [Лопес де Гереню и др., 2005, с. 411].

Как известно из теории явлений переноса (см., например, [Филиппов, 1986, с. 11]) удельный поток компонента, переносимого путем движения среды, обладающей конечной макроскопической скоростью w , равен произведению концентрации этого компонента (C_A) на w .

Однако в реальных условиях атмосферы такой мгновенный поток будет сильно меняться во времени из-за постоянных изменений (флуктуаций) скорости ветра и концентрации. Очевидно, что для

вычисления сколько-нибудь устойчивого значения удельного потока необходимо будет произвести осреднение по некоторому интервалу времени, т.е. вместо простого произведения C_A на w – использовать формулу

$$Q = \hat{E}[C_A \cdot w]. \quad (\#7j)$$

где $\hat{E}[]$ – оператор усреднения по времени. Используя разложения Рейнольдса для вертикальной скорости ветра ($w = \hat{E}[w] + w'$) и концентрации газа ($C_A = \hat{E}[C_A] + C_A'$), можем записать:

$$Q = \hat{E}[C_A \cdot w] = \hat{E}[(\hat{E}[C_A] + C_A') \cdot (\hat{E}[w] + w')] = \hat{E}[(\hat{E}[C_A] \cdot \hat{E}[w] + \hat{E}[C_A] \cdot w' + C_A' \cdot \hat{E}[w] + C_A' \cdot w')] = \\ = \hat{E}[\hat{E}[C_A] \cdot \hat{E}[w]] + \hat{E}[\hat{E}[C_A] \cdot w'] + \hat{E}[C_A' \cdot \hat{E}[w]] + \hat{E}[C_A' \cdot w'],$$

где w' , C_A' – пульсации (отклонения от среднего значения, называемые также «флуктуациями»), соответственно, вертикальной скорости ветра и концентрации газа. Поскольку из разложения Рейнольдса следует, что $\hat{E}[w'] = \hat{E}[C_A'] = 0$, то

$$\hat{E}[\hat{E}[C_A] \cdot w'] = \hat{E}[C_A] \cdot \hat{E}[w'] = \hat{E}[C_A] \cdot 0 = 0, \quad \hat{E}[C_A' \cdot \hat{E}[w]] = \hat{E}[C_A'] \cdot \hat{E}[w] = 0 \cdot \hat{E}[w] = 0$$

и, следовательно,

$$Q = \hat{E}[C_A] \cdot \hat{E}[w] + \hat{E}[C_A' \cdot w'], \quad (\#8)$$

Таким образом, при работе по методу «eddy correlation» необходимо с высокой частотой в течение некоторого интервала времени измерять вертикальную скорость ветра (w) и концентрацию интересующего газа (C_A) на одной и той же высоте. Далее следует найти средние значения этих величин ($\hat{E}[w]$ и $\hat{E}[C_A]$). Потом следует вычислить отклонения w и C от этих средних в каждый момент времени ($w' = w - \hat{E}[w]$ и $C_A' = C_A - \hat{E}[C_A]$) и перемножить их ($C_A' \cdot w'$), а затем весь полученный ряд произведений усреднить ($\hat{E}[C_A' \cdot w']$). Вычисленные таким образом величины $\hat{E}[w]$, $\hat{E}[C_A]$ и $\hat{E}[C_A' \cdot w']$, подставляют в (#8) и получают удельный поток Q .

Moncrief et al. [1997] считают возможным в левой части соотношения (#8) пренебрегать первым членом (т.е. принимается $\hat{E}[w]=0$). В других же работах предлагается оставлять оба члена [Fan et al., 1992; Ritter et al., 1992]. Наконец, существуют работы (например, [Inoue et al., 1997; Yazawa et al., 1997]), которые в качестве искомого турбулентного потока рассматривают только член $\hat{E}[C_A' \cdot w']$; в этих работах предлагается использовать формулу, получаемую после подстановки (#7j) в (#8): $\hat{E}[C_A' \cdot w'] = \hat{E}[C_A \cdot w] - \hat{E}[C_A] \cdot \hat{E}[w]$; но при этом надо понимать, что в указанных работах искомым удельный поток считается равным $\hat{E}[C_A' \cdot w']$, т.е. только что приведенная формула дает два пути вычисления удельного потока: либо путем усреднения пульсаций, либо по формуле $\hat{E}[C_A \cdot w] - \hat{E}[C_A] \cdot \hat{E}[w]$.

Ссылки на литературу, содержащую полезные элементы теории метода «eddy correlation», конкретные технические детали и полученные этим методом результаты измерения эмиссии газов из почвы приведены, например, в [Глаголев, 2010]. Помимо указанной там литературы обратим внимание заинтересованного читателя еще и на [Belelli Marchesini et al., 2007; Etzold et al., 2010; Eugster et al., 2007; Fox et al., 2008].

Некоторые подробности технической реализации метода «eddy correlation»

Оценим, какими характеристиками должны обладать измерительные приборы, чтобы возможно было измерить поток, например, метана методом «eddy correlation». Конечно, оценка будет сильно зависеть от того или иного местообитания и времени года, определяющих мощность источника газа и характерные параметры поля скорости ветра. Мы ограничимся оценкой для условий юго-восточной части Васюганского болота в летний период.

Прежде всего оценим необходимую частоту измерений. В [Глаголев и др., 2010, рис. 17] показана типичная суточная динамика отклонения текущей вертикальной скорости ветра от его средней скорости (полученная 06.08.1995 на высоте 5 м над Бакчарским болотом в Томской обл.). Из нижней части рисунка очевидно, что высокочастотная составляющая колебаний скорости ветра имеет частоту порядка 0.01 Гц (за 27 мин отмечено 17 минимумов и 18 максимумов). Для надежных измерений хорошо бы иметь в запасе около порядка, поэтому можно считать, что **требуемая частота измерения скорости**

ветра и концентрации газа для метода «eddy correlation» составляет около 0.1 Гц. Правда Inoue and Makshyutov [1994] считают, что требуемая частота составляет 10 Гц (!!!) при измерениях вблизи земной поверхности и уменьшается до 1 Гц вдали от нее (например, если измерения осуществляются с борта самолета-лаборатории). Лопес де Гереню и др. [2005] также указывают, что флуктуации вертикальной скорости и концентрации газообразного вещества происходят с частотой порядка десятков герц. С частотой 10 Гц (в течение 820 сек) запомнились данные измерений, широко описанных в литературе – см., например, [Harazono et al., 1998; Shimoyama et al., 1999; Machimura et al., 2000] так что *de facto частота 10 Гц является стандартом при измерениях по методу «eddy correlation».*

Теперь оценим необходимую точность измерений. Требуемая точность измерения скорости ветра очевидна из [Глаголев и др., 2010, рис. 17] – в ночные часы амплитуда колебаний вертикальной составляющей скорости ветра составляет порядка 0.01 м/с, а в дневные – 0.1 м/с. Таким образом, **для надежного определения потока точность измерения скорости ветра должна быть лучше, чем 0.01 м/с**, а если ограничиваться только дневными измерениями, то она может быть на порядок хуже. Но как оценить необходимую точность измерения концентрации? В первом приближении можно считать, что колебания концентрации исследуемого газа на любой высоте пропорциональны колебаниям вертикальной составляющей скорости ветра на этой высоте. Действительно, пусть измерения ведутся на некотором уровне z над землей, характеризующимся своей средней концентрацией метана. Если в какой-то момент времени $w' > 0$, это значит, что в этот момент вертикальная составляющая скорости на высоте z направлена вверх. Следовательно, на высоту z будет привнесен метан из нижнего слоя, где концентрация его выше, поэтому $C_A' > 0$. Рассуждая аналогично в случае $w' < 0$ (вертикальная составляющая скорости направлена вниз), получаем $C_A' < 0$ – на уровень z поступает воздух из вышележащих слоев, где концентрация метана меньше.

Таким образом, мы принимаем, что

$$C_A' \approx a \cdot w', \quad (\#9)$$

где a – коэффициент пропорциональности. Значение этого коэффициента мы пока не знаем, но если поток Q известен из каких-то независимых измерений, то a можно приблизительно выразить через него из (#8) и (#9):

$$a \approx Q / \hat{E}(w' \cdot w').$$

Теперь, когда мы знаем численное значение a , ничто не мешает нам рассчитать динамику C_A' . Итак, если на какой-либо высоте над поверхностью земли динамика колебаний отклонения текущей скорости ветра от средней его скорости задается последовательностью значений w' (м/с), то динамика колебаний отклонения текущей концентрации какого-либо газа, поглощаемого или выделяемого почвой с интенсивностью Q (мгС·м⁻²·с⁻¹), будет (с точностью до знака) определяться соотношением

$$C_A' \approx Q \cdot w' / \hat{E}(w' \cdot w').$$

Учитывая, что в момент измерения скоростей ветра, представленных в [Глаголев и др., 2010, рис. 17], поток метана составлял около 15 мгС·м⁻²·час⁻¹ [Glagolev, 1998], получаем значение $a \approx 0.3$ мгС·с/м⁴. Согласно исходному предположению (#9), динамика колебаний C_A' с точностью до амплитуды совпадает с динамикой $w'(t)$. Амплитуда эта составляет около 0.2 мгС/м³ в дневные часы и на порядок меньше – в ночные. Таким образом, для измерения потока метана методом «eddy correlation» в указанных условиях оказалось бы достаточным использовать аналитическое оборудование, позволяющее надежно определять концентрации порядка 0.01 ppm (или 0.1 ppm, если ограничиваться только дневными измерениями).

Кроме частоты и точности измерений на вычисленную величину потока будет влиять процедура усреднения [Inoue et al., 1997]. При обсуждении этого вопроса оценки Inoue et al. становятся уже ближе к нашим: авторы отмечают, что их целью при усреднении было избавиться от колебаний с частотой до порядка 0.1 Гц, тем самым признавая, что естественные колебания скорости ветра и концентрации происходят с частотами, меньшими указанной. Данная цель достигается усреднением на интервале времени 10 сек.

Yazawa et al. [1997] обращают внимание на одну особенность технической реализации метода «eddy correlation», могущую породить ошибки при определении потока. Речь идет о возможной задержке между отбором пробы и ее анализом, что приводит к смещению по фазе между колебаниями скорости ветра (которая, как мы предполагаем, измеряется мгновенно) и концентрации. В реальных измерительных системах эта задержка составляла от долей секунды (например, 0.5 с для влажности) до нескольких секунд (например, 4 с для CO₂). В принципе, в этой задержке нет ничего страшного, однако ее надо точно знать, чтобы перед проведением расчетов сдвинуть влево временной ряд концентраций относительно временного ряда скоростей ветра на величину данного фазового сдвига. Если же такой сдвиг не производить, то удельный поток будет определяться с ошибкой, которая очень быстро станет недопустимо большой. Так например, уже при сдвиге 30 с расчетная величина удельного потока падает почти в 10 раз по сравнению с истинным значением, а при дальнейшем увеличении сдвига, упав еще немного, колеблется совершенно хаотически, независимо от сдвига.

Для компенсации фазового сдвига необходимо определить задержку (U), вызванную как транспортом пробы по трубкам к газоанализатору, так и самим временем анализа. Способ определения времени задержки основан на понятии корреляции двух временных рядов [Yazawa et al., 1997]. Взаимной корреляционной функцией между процессами $C_A(t)$ и $w(t)$ при задержке Δt называется выражение

$$\rho_{C_A w} = \hat{E}\{[C_A(t) - \hat{E}(C_A)] \cdot [w(t + \Delta t) - \hat{E}(w)]\} / (\sigma_{C_A}^2 \cdot \sigma_w^2)^{1/2},$$

где $\sigma_{C_A}^2$, σ_w^2 – дисперсии процессов [Горбенко и Крышев, 1985]. Из (#9) и только что приведенного определения $\rho_{C_A w}$ следует, что

$$\max[\rho_{C_A w}(\Delta t)] = \rho_{C_A w}(U) = 1.$$

Конечно, в случае реальных экспериментальных данных максимум будет несколько меньше единицы, но, в любом случае, он будет достигаться при $\Delta t = U$, откуда и определяется U . На наш взгляд, вычисление $\rho_{C_A w}$ полезно еще и потому, что позволяет оценить качество работы метода «eddy correlation». Чем сильнее отличается $\max(\rho_{C_A w})$ от единицы, тем сильнее данная конкретная техническая реализация метода отстоит от идеальной теоретической.

К сожалению, широкому использованию метода (в нашей стране) мешает чрезвычайно высокая стоимость измерений – ведь необходимо иметь приборы, способные порядка нескольких раз за минуту достаточно точно измерить скорость ветра и, что еще сложнее, концентрацию интересующего исследователя газа.

Необходимой производительностью и точностью измерений скорости ветра обладает УЗА. Более того, его производительность намного превышает требуемую. Например, японские исследователи при измерениях с борта самолета-лаборатории использовали анемометр с частотой 200 кГц [Yazawa et al., 1995]. Принцип действия УЗА состоит в следующем. В неподвижном воздухе ультразвук (волны с частотой более 20 кГц) распространяется приблизительно со скоростью 340 м/с, но в воздушном потоке эта скорость уже не будет постоянной. Когда волна распространяется в направлении ветра, она движется быстрее (на величину скорости ветра), когда в направлении против ветра, то – медленнее (на ту же самую величину). В простейшем УЗА два ПЭП расположены друг напротив друга на расстоянии L_{USA} . В определенные моменты времени ультразвуковые импульсы посылаются от одного преобразователя к другому. Обозначим через t_{1-2} и t_{2-1} интервалы времени, необходимые для переноса ультразвукового импульса, соответственно от первого ПЭП ко второму и от второго к первому. Эти интервалы времени можно определить по формулам

$$t_{1-2} = L_{USA} / (V_{US} + V_x), \quad t_{2-1} = L_{USA} / (V_{US} - V_x),$$

где V_x – проекция скорости ветра на ось, вдоль которой расположены преобразователи; V_{US} – скорость ультразвука в неподвижном воздухе. Из этих уравнений можно получить V_x как функцию лишь t_{1-2} , t_{2-1} и L_{USA} (т.е. возможно избавиться от V_{US}):

$$V_x = 0.5 \cdot L_{USA} \cdot (t_{2-1} - t_{1-2}) / (t_{1-2} \cdot t_{2-1}).$$

Таким образом, УЗА может измерить скорость ветра независимо от температуры и давления, в результате чего удастся достичь великолепной стабильности результатов [Yazawa et al., 1999]. Конечно, выше был описан лишь принцип действия анемометра; обычно данный прибор имеет не два ПЭП, а больше, чтобы было возможно измерять проекции скорости ветра на все три координатные оси физического (трехмерного) пространства.

Итак, высокочастотное определение параметров воздушного потока вполне возможно при современном уровне развития техники. Но высокочастотное непрерывное определение концентрации невозможно осуществить при помощи хроматографии, обычно используемой для анализа газов, поскольку она требует нескольких минут (или хотя бы десятков секунд) на каждую пробу. При анализе концентраций CH₄ и CO₂ в методе микровихревых пульсаций часто используются оптические газоанализаторы.

Поступила в редакцию: 29.03.2013
Переработанный вариант: 15.06.2013