

УДК 631.4

О ВЛИЯНИИ ВЕТРА НА ГАЗООБМЕН ПОЧВЫ И АТМОСФЕРЫ

© 2021 г. А. В. Смагин^{a, c, d}, Д. В. Карелин^{b, *}^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия^bИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, Москва, 119017 Россия^cРоссийский Университет Дружбы Народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия^dИнститут лесоведения РАН, ул. Советская, 21, Успенское, Московской обл., 143030 Россия

*e-mail: dkarelin7@gmail.com

Поступила в редакцию 23.05.2020 г.

После доработки 25.06.2020 г.

Принята к публикации 26.06.2020 г.

Глобальные климатические изменения последних десятилетий сопровождаются ростом температуры и потенциальным усилением циклонической активности с мощными воздушными потоками. Как они отражаются на почвенном дыхании? Можно ли ожидать при этом усиление эмиссии CO₂ и, как следствие, положительную обратную связь с глобальными климатическими изменениями через парниковый эффект? На эти вопросы невозможно дать ответ без исследований реакции газообмена почв и атмосферы на воздействие ветра с разной скоростью в различных ландшафтах. В статье обобщаются результаты многолетних наблюдений за эмиссионными потоками CO₂ в черноземах типичных лесостепной подзоны (Курская обл.) в природных и антропогенных ландшафтах под лесной и травянистой растительностью в зависимости от скорости ветра, а также излагается физически-обоснованный кинетический подход к количественному описанию такой зависимости. Подход предполагает возможность линейного, прямо пропорционального воздействия скорости ветра на интенсивность конвективно-диффузионного транспорта и изменение концентрации газообразного углерода в биологически-активном слое почвы фиксированной мощности. Полученная на его основе модель в форме обратной параболической зависимости эмиссионного потока CO₂ от скорости ветра адекватно описывает эмпирические данные и предполагает двукратное увеличение эмиссии при повышении скорости ветра до критической величины около 3 м/с с последующей релаксацией до исходного уровня при дальнейшем усилении ветра до 6–7 м/с. Скорость вынужденной конвекции почвенного воздуха содержащего CO₂ оказывается на 6 порядков меньше скорости ветра, но не уступает интенсивности обычной изотермической диффузии CO₂, что говорит о важности учета этого механизма в моделях газообмена почвы и атмосферы.

Ключевые слова: типичные черноземы (Haplic Chernozem, Luvic Chernozem), эмиссия CO₂, скорость ветра, турбулентная диффузия, вынужденная конвекция, агроландшафты

DOI: 10.31857/S0032180X21030138

ВВЕДЕНИЕ

Проблема количественной оценки газообмена почв и атмосферы является ключевой для понимания природных закономерностей углеродного баланса различных территорий планеты и его антропогенных изменений. Именно недооценка диссимиляционной составляющей углеродного баланса в виде определенной части почвенного дыхания может быть главной причиной так называемого неучтенного стока углерода на территории РФ и северного полушария в целом [8, 11]. В свою очередь в проблеме количественного исследования дыхания почв есть свои “белые пятна”, и среди них — конвективные механизмы газообмена почв и атмосферы. Эти механизмы для автоморфных почв остаются малоисследованными, и они полностью

отсутствуют в подавляющем большинстве известных современных компьютерных моделей аэрации почв и их углеродно-кислородного газового обмена с атмосферой [12, 20, 23]. Во многом такой ситуации способствовало установившееся в науке о почвах с момента публикации классической монографии [13] и кочующее из учебника в учебник мнение о малой эффективности спорадических конвективных потоков на фоне постоянно идущей диффузии газов как главного физического механизма газообмена почв с атмосферой. Вместе с тем косвенные оценки, сопоставляющие измеренные эмиссионные потоки газов с поверхностью почвы или балансовую оценку их выноса по динамике запасов газов в профиле почвы с расчетным по закону Фика диффузионным потоком, часто указывают на действие не диффузион-

ных механизмов газообмена, интенсивность которых в 2–6 раз и более превышает изотермическую диффузию [7, 21, 18, 22].

В работе [7] была предпринята, по-видимому, первая отечественная попытка систематизации всех типов конвективного транспорта газообразных веществ в почвах и с помощью ориентировочных подсчетов показана их потенциально высокая значимость, не уступающая по вкладу в газообмен изотермической диффузии. Там же были выявлены основные проблемы количественной оценки конвективного транспорта газов в почвах, среди которых для наиболее мощного механизма вынужденной конвекции на первом месте выделяется проблема инструментального измерения градиентов пневматического давления. Предварительная оценка [7] показывает, что уже при крайне малом, градиенте давления 1 Па/м, вязкости воздуха 1.8×10^{-5} Па с и минимальных значениях воздухопроницаемости почв порядка 10^{-10} м², объемная скорость воздушного потока в почвах составит 10^{-5} м/с, что вполне соизмеримо с интенсивностью диффузии. Зарубежные исследования [15, 16, 22] на высокоточном оборудовании, позволяющем определять колебания пневматического давления порядка 1–10 Па с частотами 0.01–2 Гц экспериментально подтвердили значительную роль механизма вынужденной конвекции под действием ветра или искусственно создаваемой вентиляции почвы в углеродном газообмене почв с атмосферой. В этих работах корреляционный анализ выявляет 2–4-кратное усиление эмиссии под воздействием скорости ветра в диапазоне 0–4 м/с, пневматического давления и/или его частотных колебаний, однако большой разброс данных не позволяет четко определить функциональный вид таких зависимостей и не исключает ослабление эмиссионного потока при больших скоростях ветра.

Потенциальное усиление циклонической активности атмосферы, как следствие глобальных климатических изменений, наряду с отмеченным выше существенным вкладом механизма вынужденной конвекции в газообмен почв и атмосферы ставят задачу количественной оценки влияния интенсивности ветра на почвенное дыхание. Мы попытались решить эту задачу в первом приближении, используя статистический анализ и физико-математическое моделирование эмпирических закономерностей воздействия ветра в большом диапазоне скоростей 0–7 м/с на эмиссионные потоки диоксида углерода из почв разных ландшафтов лесостепной подзоны европейской части РФ. Новизна исследования состояла в выявлении общей для изученных почвенных объектов эмпирической зависимости эмиссии CO₂ от горизонтальной скорости ветра и попытке ее физически-обоснованного математического моделирования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В анализ вошли полевые наблюдения, собранные за три последовательных вегетационных сезона (2017–2019 гг.) в окрестностях Курской биосферной станции института географии РАН (КБС ИГ РАН), а также на близлежащей территории Центрально-Черноземного заповедника им. Алехина. Район исследований расположен в лесостепной подзоне в Медвенском р-не Курской области в 18–20 км к югу от административной границы г. Курск. Были использованы собственные оценки эмиссии CO₂ из почвы и сопутствующие метеопоказатели. Полевые измерения проводились с апреля по ноябрь, 1–4 раза в месяц, на постоянных участках, представляющих наиболее характерные местные ландшафты. Каждое внутрисезонное измерение на участках проводилось в 5–15-кратной повторности. Общее число сезонных замеров на всех изученных участках составило 273 (2017: 125; 2018: 116; 2019: 32), или с учетом повторностей – 2265. Из общего набора участков, вошедших в анализ (8), 2 – представляли спелые и перестойные лесные экосистемы (>150-летний дубовый лес (51°33'36" N; 36°7'18" E), >80-летний ясеневый лес (51°32'22" N; 36°3'56" E), 1 – зрелую >80-летнюю луговую степь (51°32'24" N; 36°5'15" E), 1 – 2-4-летнюю залежь (51°32'19" N; 36°5'14" E), 1 – постоянно используемый неудобряемый огород с ежегодно сменяющимися овощными культурами (51°32'19" N; 36°5'13" E), а 3 – постоянно используемые пашни (51°32'21" N; 36°5'6" E, 51°32'2" N; 36°3'51" E, 51°32'30" N; 36°5'12" E), куда ежегодно вносятся минеральные удобрения, с ежегодно сменяющимися зерновыми и масличными культурами.

Почвы нелесных участков относятся к типичным черноземам, *Typlic Chernozem (Loamic, Pachic)*; под лесами – выщелоченным черноземам *Luvic Chernozem (Loamic, Pachic)*.

Измерения почвенной эмиссии проводились закрытым камерным методом по стандартной методике, подробно описанной в [3]. Непрозрачные цилиндрические ПВХ-основания площадью 95 см² и объемом 1.5–2.5 л устанавливались только во время измерений (пашни) или постоянно (неиспользуемые земли) на весь вегетационный сезон. Основания устанавливали на глубину не более 2–3 см, в случае временной установки выдерживали 2 ч перед началом измерений. При возможности они ставились на участках почвы без растительности, в иных случаях наземная растительность предварительно удалялась. При проведении измерений скорости эмиссии CO₂ на основании герметично устанавливалась крышка со встроенным вентилятором, соединенная с инфракрасным газоанализатором. Время экспозиции при единичных измерениях составляло 3 мин. В качестве анализаторов использовали оригина-

нальные модификации приборов, выполненные на основе датчиков AZ-7752 (AZ Instruments, Тайвань, КНР), которые периодически калибровались по высокоточным LI-COR 6200 или LI-COR 8100A (LiCor, Небраска, США).

Данные о круглосуточной скорости ветра были получены с помощью профессиональной автоматической метеостанции 6162EU Wireless Vantage Pro2 (Davis Instruments, USA), укомплектованной чашечным анемометром. Метеостанция была установлена на КБС в апреле 2017 г. на ровной открытой поверхности, анемометр закреплен на высоте 2.2 м. Опытные участки были расположены в пределах 15–2000 м от метеостанции. Значения скорости ветра, полученные с точностью до 0.1 м/с, усреднялись за получасовые интервалы. Внутрисезонные величины эмиссии CO₂ из почвы на опытных участках сопоставлялись со средними величинами скорости ветра за 3 ближайших к периоду проведения измерений получасовых интервала. В дальнейшем для анализа использовали значения, представляющие собой средние из 5–15 повторностей при оценках скорости почвенной эмиссии. Для каждого биотопа данные за все вегетационные сезоны объединяли.

Дополнительно для сравнения были привлечены наши материалы многолетних наблюдений за потоками CO₂ микрометеорологическим методом измерений (open-path eddy covariance) на уровне экосистемы в целом [5]. Эти измерения проводились в южно-таежной подзоне на Валдайской возвышенности в 120-летних ельниках мелкотравно-зеленомошных на почве, отвечающей критериям дерново-подзола контактно-осветленного (Stagnic Albic Rustic Podzol (Arenic, Raptic)) (стационар ГГИ Росгидромета РФ, Валдайский р-н, Новгородская обл.) [4]. В массив данных, который использовался для анализа, вошли все имеющиеся 0.5-часовые оценки неттопотоков CO₂ и скорости ветра в ночные периоды за вегетационные сезоны 2017–2019 гг. Потоки оценивались с помощью инфракрасного анализатора LI-7500 (LI-COR Inc., USA), а горизонтальная скорость ветра – ультразвуковым анемометром CSAT-3 (Campbell Scientific Inc., USA) с частотой 10 Hz. Общий массив данных в этом случае составил 3462 значения.

Статистическая и математическая обработка данных, включая оценку параметров предложенной нелинейной модели, осуществлялись с использованием стандартных функций MS Excel 2007 и алгоритмов нелинейной регрессии “Regression Wizard” S-Plot-2001, согласно руководству [1]. В качестве уровня значимости выбран $p = 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теоретическое обоснование. Априори ветровой поток может оказывать двоякое воздействие на газообмен почвы и атмосферы. С одной стороны, он способствует турбулентному газообмену, усиливая коэффициент турбулентной диффузии и активизирует механизм вынужденной конвекции воздуха с мощными, на порядки превышающими обычный диффузионный транспорт, разовыми выбросами CO₂ из верхних слоев почвы [7]. Но подобная вентиляция почвы резко снижает градиент концентрации между почвой и атмосферой, что в свою очередь должно ингибировать диффузионный транспорт CO₂, как основной, постоянно действующий механизм эмиссии в автотрофных почвах. Указанные тенденции можно формализовать в первом (линейном) приближении, считая, что влияние на транспорт и концентрацию CO₂ происходит пропорционально изменениям скорости ветра, согласно [16, 18, 22], исходя из следующих допущений.

Эмиссионный поток CO₂ в атмосферу (Q , г С/(м² ч) есть произведение скорости массопереноса (ω , м/ч) на разность концентраций (C , г/м³) газа между почвой и атмосферой: $Q = \omega(C - C_{\text{атм}})$. Такая запись позволяет объединить все известные механизмы газообмена верхнего слоя почвы с атмосферой, а именно – диффузию, турбулентную диффузию, естественную и вынужденную конвекцию [7]. Для конвективных механизмов, очевидно, ω есть суммарная скорость соответствующих потоков; для диффузионных – она может быть представлена в первом приближении как отношение эффективных коэффициентов (D , м²/ч) диффузии (турбулентной диффузии) к характерной мощности слоя почвы (Δz , м), в котором происходят наиболее интенсивная газогенерация и диффузионный газообмен: $\omega = D/\Delta z$ [12]. Характерная мощность почвенной зоны, в которой сосредотачивается до 90% биологической активности и связанного с ней газообмена, согласно [9], редко превышает 10–20 см. Поэтому при типичных для автотрофных почв величинах эффективного коэффициента диффузии 100 см²/ч (0.01 м²/ч) [7], скорость диффузии будет оцениваться величиной $\omega \leq 0.1$ м/ч.

Поскольку для CO₂ концентрация в почве на 1–2 порядка больше, чем в атмосфере ($C \gg C_{\text{атм}}$), в расчетах потоков можно пренебречь величиной $C_{\text{атм}}$ и оценивать потоки как произведение скорости на концентрацию в почве (ωC). Тогда изменения эмиссионного потока под вентилирующим действием ветра со скоростью (v) будет выглядеть как:

$$\begin{aligned} dQ &= d(\omega C - kvC) = \\ &= d\omega C + \omega dC - kvdC - kvdC, \end{aligned} \quad (1)$$

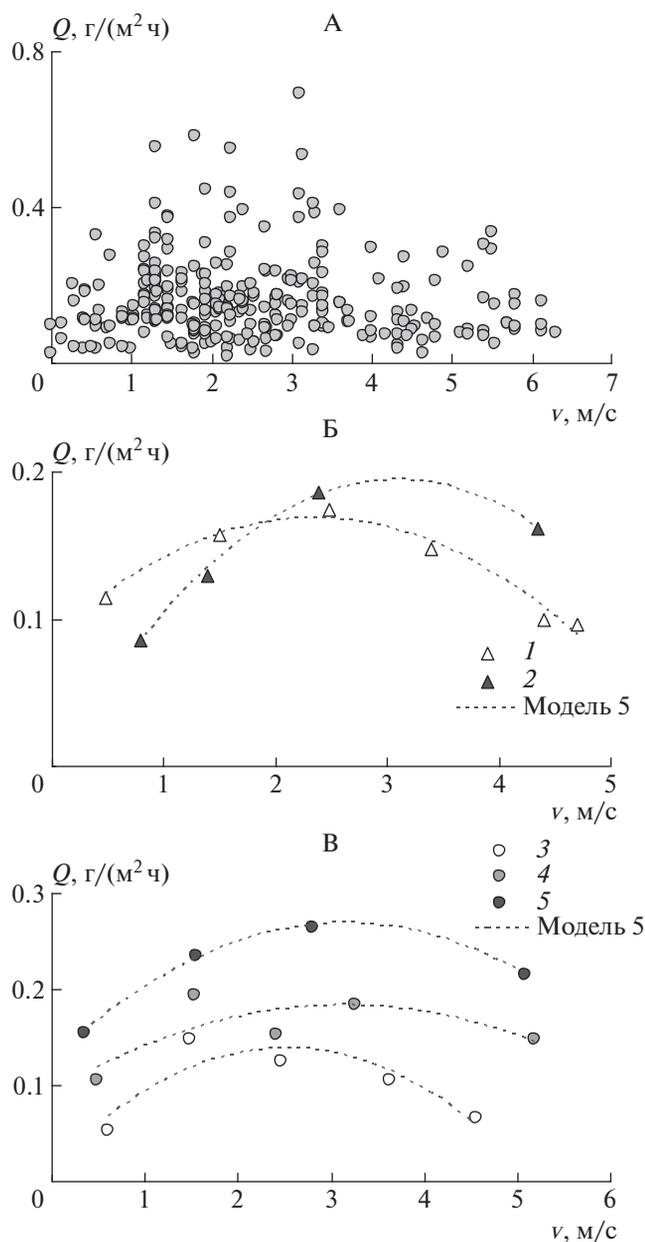


Рис. 1. Связь потока диоксида углерода из почвы (Q) со скоростью ветра (v) и результаты моделирования. Обозначения: А – общий массив данных. Б – лесные ландшафты: 1 – 80-летний ясеневый лес и 2 – 150-летняя дубрава; В – травянистые и лесостепные смешанные ландшафты разного землепользования: 3 – удобряемая пашня, 4 – ковыльная луговая лесостепь, 5 – четырехлетняя залежь. На частях Б и В приведены средние величины эмиссии в диапазонах скорости ветра 0–1, 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, >5 м/с.

где k – безразмерный трансляционный коэффициент, оценивающий в первом (линейном) приближении насколько медленнее происходит конвективное движение в пористой среде почвы по сравнению с его скоростью в атмосфере.

Усиление турбулентного газообмена и вынужденной конвекции при порывах ветра над поверхностью почвы выразим как:

$$d\omega = b dv, \quad \omega = \omega_0 + bv, \quad (2)$$

где ω_0 – скорость массопереноса газа при отсутствии ветра ($v = 0$), b – безразмерный коэффициент пропорциональности.

По аналогии в первом (линейном) приближении формализуем влияние ветра на динамику концентрации CO_2 :

$$dC = a dv, \quad C = C_0 + av, \quad (3)$$

где C_0 – концентрация газа при отсутствии ветра ($v = 0$), a – коэффициент пропорциональности, имеющий в зависимости от единиц измерения скорости, размерность г с м^{-4} или г ч м^{-4} .

Подстановка (2) и (3) в (1) после несложных алгебраических преобразований дает следующее дифференциальное уравнение для связи эмиссионного потока CO_2 и скорости ветра:

$$dQ = (av_0 - mC_0)dv - 2amv dv, \quad (4)$$

где $m = k - b$.

Разделяя переменные и интегрируя (4) в пределах $(Q; Q_0)$ и $(0; v)$, получим следующее уравнение для оценки динамики эмиссионного потока CO_2 под действием ветра:

$$Q(v) = Q_0 + (a\omega_0 - mC_0)v - amv^2 = Q_0 + Av - Bv^2, \quad (5)$$

где $A = a\omega_0 - mC_0$, $B = am$, $Q_0 = \omega_0 C_0$.

Уравнение (5) представляет собой параболическую зависимость $Q(v)$, причем эмпирические коэффициенты параболы A , B позволяют оценить при известной концентрации газа в почве (C_0) в безветренную погоду физические параметры модели:

$$\omega_0 = \frac{Q_0}{C_0}; \quad a = C_0 \frac{\sqrt{A^2 + BQ_0 + A}}{Q_0}; \quad m = \frac{B}{a}, \quad (6)$$

а также найти критическую скорость ветра ($v_{\text{кр}}$), при которой должен наблюдаться максимум эмиссии CO_2 (Q_{max}):

$$v_{\text{кр}} = \frac{A}{2B} = \frac{\omega_0 - C_0}{2a}. \quad (7)$$

Следующий раздел работы сопоставляет изложенные выше теоретические представления с реальными данными многолетних наблюдений за эмиссией CO_2 в разных ландшафтах под воздействием ветра.

Экспериментальные данные и их анализ. На рис. 1, А представлен весь массив данных $Q(v)$ под разными типами растительности и землепользования на черноземах. Как видно, первич-

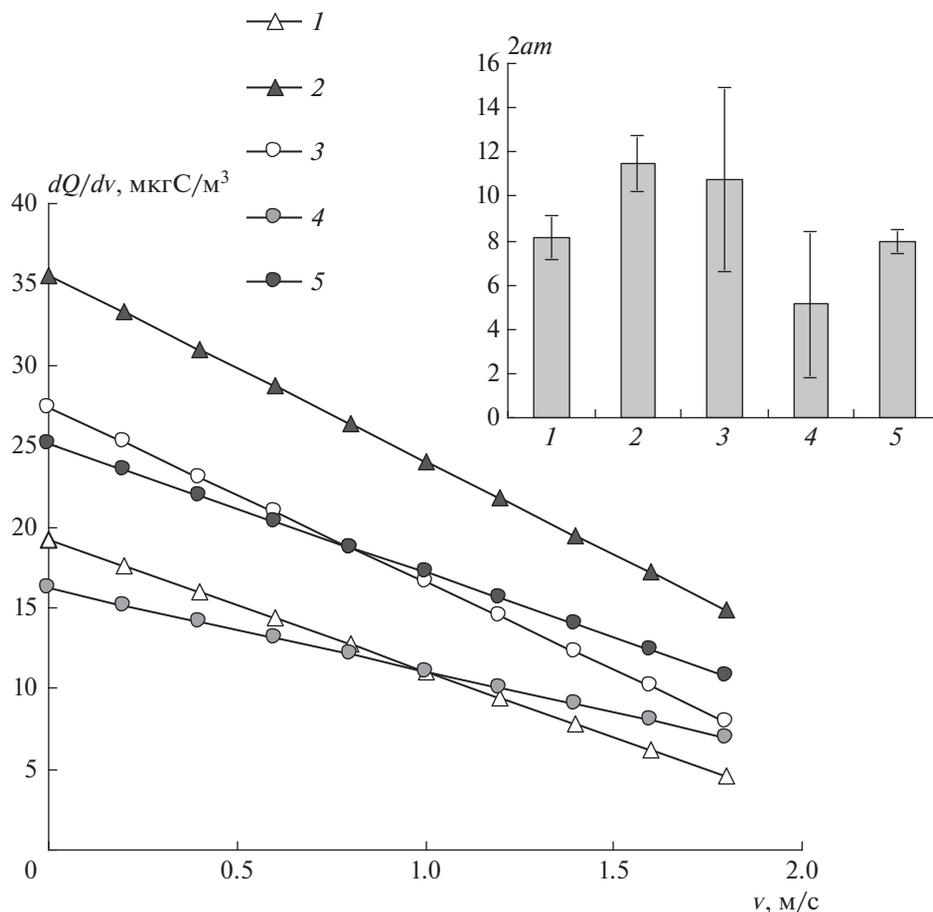


Рис. 2. Связь относительного изменения эмиссии CO_2 и скорости ветра (основной рисунок) и тангенс угла наклона ($2am$) полученных зависимостей (врезка) для почв ландшафтов лесостепи (обозначения 1–5 – см. на рис. 1).

ные данные во всем объеме не демонстрируют сколько-либо выраженной функциональной связи рассматриваемых величин, что, впрочем, характерно для корреляционного анализа эмиссионных потоков и объясняется, как сильным пространственно-временным варьированием эмиссии CO_2 , так и нелинейностью воздействия на нее большинства контролирующих физических факторов. Обращаем внимание на этот результат в связи с малой эффективностью распространенных попыток оценивать реакцию почвенного дыхания и углеродного цикла на глобальные климатические изменения чисто статистически, с использованием корреляций с метеофакторами, априорно нелинейно контролирующими данный процесс [2, 6].

Для поиска функциональной зависимости $Q(v)$, мы произвели ранжирование показателя v с интервалом 1 м/с и усреднением внутри полученных классов величин v и Q . Выборочные результаты такой обработки по индивидуальным ландшафтам различных категорий землепользования приведены на рис. 2, Б, 2, В. В подавляющем большинстве случаев зависимость $Q(v)$ имела не-

линейный характер с пологим одновершинным экстремумом (максимумом) и хорошо описывалась параболическим уравнением (5). Коэффициенты детерминации R^2 варьировали от 0.77 до 0.99 при стандартных ошибках аппроксимации (s) меньших, чем доверительные интервалы варьирования экспериментальных данных, и значимых на уровне $0.004 \leq p \leq 0.05$ параметрах модели, исключая показатель Q_0 , который в ряде случаев оказывался статистически не достоверным. Наибольшее соответствие экспериментальных данных теоретической модели (5) было выявлено для лесных ландшафтов и лесостепной залежи ($R^2 = 0.95-0.99$, $s = 4.7-5.1$ мгС/(м² ч)). По-видимому, под пологом лесной растительности сглаживаются резкие порывы ветра с неизбежными флюктуациями концентраций и эмиссионных потоков CO_2 , поэтому экспериментальные зависимости $Q(v)$ в максимальной степени приближаются к теоретическому уравнению параболы (5).

Параметры аппроксимации и расчетные физические показатели модели (5) приведены в табл. 1. Критическая скорость ветра ($v_{кр}$), при которой на-

Таблица 1. Эмпирические параметры и расчетные физические показатели модели (5)*

Ландшафт	Q_0 , мг С/(м ² ч)	A, г/м ³	B, г ч м ⁻⁴	m	a, мкг ч м ⁻⁴	V _{кр} , м/с	Q_{max} , мг С/(м ² ч)	Q_{max}/Q_0
80-летний ясеневый лес	87 ± 11	0.0691 ± 0.0098	0.0146 ± 0.0018	$2.4 \times 10^{-6} \pm$ $\pm 2.4 \times 10^{-8}$	471 ± 63	2.37 ± 0.04	168 ± 24	1.9
150-летняя дубрава	0 ± 13	0.1281 ± 0.0125	0.0207 ± 0.0028	$2.9 \times 10^{-7} \pm$ $\pm 4.0 \times 10^{-9}$	5556 ± 539	3.10 ± 0.04	194 ± 30	—
Удобрямая пашня	13 ± 43	0.0985 ± 0.0399	0.0194 ± 0.0075	$3.6 \times 10^{-7} \pm$ $\pm 6.7 \times 10^{-9}$	4173 ± 1679	2.53 ± 0.06	138 ± 96	—
Ковыльная луговая степь	91 ± 44	0.0582 ± 0.0355	0.0092 ± 0.0059	$1.9 \times 10^{-6} \pm$ $\pm 1.8 \times 10^{-7}$	377 ± 73	3.13 ± 0.19	183 ± 97	2.0
2-4-летняя залежь	126 ± 6	0.0904 ± 0.0055	0.0143 ± 0.0010	$2.6 \times 10^{-6} \pm$ $\pm 3.1 \times 10^{-8}$	421 ± 25	3.15 ± 0.03	269 ± 13	2.1
Все лесостепные ландшафты	82.4 ± 33.7	—	—	$1.60 \times 10^{-6} \pm$ $\pm 7.5 \times 10^{-7}$	1544 ± 1119	2.8 ± 0.4	180 ± 38	2.2
Южная тайга**	78 ± 24	0.1354 ± 0.0184	0.0209 ± 0.0029	$1.6 \times 10^{-6} \pm$ $\pm 8.4 \times 10^{-9}$	988 ± 131	3.22 ± 0.06	297 ± 53	3.8

* Приведенные в таблице величины расшифрованы в тексте.

** Показатели по южной тайге рассчитаны по ночным нетто-потокам CO₂, полученным микрометеорологическим методом (пояснения в тексте).

блюдается максимальный эмиссионный поток CO_2 варьирует от 2.2 до 3.2 м/с при среднестатистической для всех исследованных ландшафтов величине 2.8 ± 0.4 м/с. Наибольшие значения критической скорости отмечались в местообитаниях с густой естественной растительностью (леса, ковыльная лесостепь, залежь), наименьшие — на пахотных угодьях, что в первом случае очевидно было связано с сопротивлением ветру со стороны растительного полога.

Максимальные величины потоков газообразного углерода (C-CO_2) при критической скорости ветра в лесных экосистемах варьировали от 168 ± 24 мгС/(м² ч) в 80-летнем ясеневом лесу до 194 ± 15 мг С/(м² ч) в 150-летней дубраве, а в травянистых и смешанных лесостепных сообществах черноземной зоны от 138 ± 96 мг С/(м² ч) на пахотных удобряемых угодьях до 269 ± 13 мг С/(м² ч) на залежи. Эмпирическое отношение максимального потока при критической скорости ветра к статистически достоверной эмиссии при нулевой скорости ветра (Q_{max}/Q_0) варьировало незначительно (1.9–2.2) и в большинстве случаев было близко к 2. Исключения составили варианты оценок для 150-летней дубравы и удобряемой пашни, где эмпирический показатель Q_0 модели (5) оказался статистически не значимым ($p = 0.78\text{--}0.79$) и воспроизводился с большой погрешностью. В принципе, для подавляющего большинства случаев можно было подобрать комбинацию эмпирических параметров A , B , Q_0 из доверительных интервалов их варьирования при $p = 0.05$, так, чтобы выполнялось условие $Q_{\text{max}}/Q_0 = 2$ при сохранении адекватного описания экспериментальных данных параболой (5). Такое аналитическое ограничение модели (5) имеет понятное физическое следствие — максимальное усиление эмиссионного потока под действием ветра должно быть двукратным. Иными словами, исследуемый массив данных удовлетворяет условию $Q_{\text{max}}/Q_0 = 2$ в пределах варьирования эмпирических коэффициентов модели (5) на уровне значимости 0.05. Это важно для понимания закономерностей реакции почвенного газообмена на скорость ветра положение требует дальнейшей экспериментальной проверки на больших массивах данных.

До получения уточняющей эмпирической информации, для расчета физических параметров ω_0 , a , m модели (5) по формулам (6), использовали условно одинаковую для всех вариантов опытов величину средней концентрации газообразного углерода в почвенном воздухе $C_0 = 1$ г С/м³, что дает содержание $\text{CO}_2 = 3.67$ г/м³ или $\sim 0.2\%$ CO_2 по объему. Эта оценка близка к среднепланетарной концентрации CO_2 в почвенном воздухе, равной 0.25% по данным обзора [10]. Тогда величина ω_0 , согласно первой из формул (6) становится числен-

но равной Q_0 . Полученные таким образом значения ω_0 варьировали в диапазоне 0.012–0.22 м/ч при средней по всему массиву данных величине 0.09 ± 0.04 м/ч, что близко к приведенной в теоретической части оценке $\omega \leq 0.1$ м/ч и подтверждает доминирование диффузионного механизма в почвенной эмиссии CO_2 при отсутствии ветра.

Подстановка C_0 в формулы (6) позволяет также оценить пределы изменчивости характерных значений физических параметров a , m модели (5). Безразмерный трансляционный показатель m варьировал от 2.9×10^{-7} до 4.1×10^{-6} при среднестатистической по всему массиву экспериментальных данных величине $m = 1.6 \times 10^{-6} \pm 7.5 \times 10^{-7}$. Он отражает крайне интенсивное (порядка миллиона раз) потенциальное понижение скорости ветра и соответствующего конвективно-диффузионного массопереноса газов в пористой среде почвы по сравнению с атмосферой. Минимальные значения m наблюдались в вариантах почв 150-летней дубравы ($2.9 \times 10^{-7} \pm 4.0 \times 10^{-9}$) и удобряемой пашни ($3.6 \times 10^{-7} \pm 6.7 \times 10^{-9}$), что в первом случае может быть следствием высоты и густоты растительного покрова, оказывающего сильное сопротивление ветру, а во втором — результатом уменьшения пористости и воздухопроницаемости почвы при уплотнении и деградации структуры под воздействием частой механической обработки и внесения электролитов (минеральных удобрений).

Показатель a , оценивающий насколько сильно меняется концентрация в почве (dC) от порывов ветра (dv), согласно (6) обратно-пропорционально связан с m , поэтому закономерности его варьирования по вариантам экспериментов противоположны предыдущим. В почвах 150-летней дубравы и удобряемой пашни значения a были максимальны и составили 5556 ± 539 мкг ч м⁻⁴ и 4173 ± 1679 мкг ч м⁻⁴ соответственно. Для других участков лесостепи показатель a был на порядок меньше и менялся в диапазоне 377 ~ 471 мкг ч м⁻⁴.

Несмотря на достаточно сильное варьирование показателей a и m , их удвоенное произведение ($2am$), отражающее, согласно (4) интенсивность изменения эмиссионного потока с приращением скорости ветра (dQ/dv), менялось в относительно небольшом диапазоне от 18 до 41 мг С/(м² ч) на каждый метр в секунду изменений скорости ветра, или при пересчете скорости ветра на м/час от 5 до 11 мкг С/м³. Для наглядности на рис. 2 мы расположили рассчитанные по (4) выборочные тренды изменения интенсивности эмиссии относительно приращения скорости ветра (dQ/dv) или производную плотности потока по скорости ветра, имеющую, как и коэффициент $2am$, размерность концентрации (мкг С/м³). Показателю $2am$ на графиках соответствует тангенс угла наклона по-

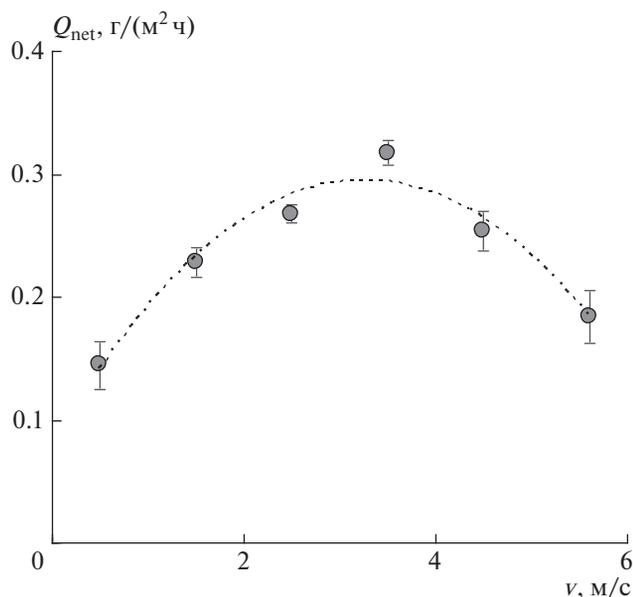


Рис. 3. Зависимость нетто-потока CO₂ (Q_{net}) от горизонтальной скорости ветра (v) в ночные периоды (0–3 ч), полученная в результате наблюдений микрометеорологическим методом (южная тайга, валдайский филиал ГГИ Росгидромета РФ, апрель–октябрь 2017–2019). Приведены средние значения Q_{net} в диапазонах скорости ветра 0–1, 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 5–6 м/с, и их стандартные ошибки при размерах выборок для отдельных точек от 54 до 1415.

лученных прямых. Как видим, все прямые имеют близкие наклоны (числовые значения — см. врезку на рис. 2), причем сравнение величин с учетом доверительных интервалов, оцененных по варьированию аппроксимационного эмпирического параметра $B = am$ (см. табл. 1) показывает, что практически все варианты по данному показателю значимо не отличаются. Средний показатель $2am$ по выборке на рис. 2 составил 31.3 ± 9.2 мг С/(м² ч) на каждый метр в секунду изменений скорости ветра или 8.7 ± 2.5 мкг С/м³ изменений концентрации газообразного углерода.

В завершение мы сравнили полученные результаты с массивом данных по эмиссии CO₂, полученных с помощью принципиально иного метода и в других почвенно-климатических условиях. Такую возможность предоставляют многолетние микрометеорологические наблюдения за потоками CO₂ и паров воды, проводящиеся в еловой тайге на Валдайской возвышенности. В данном случае мы использовали оценки ночных (0–3 ч) нетто-потоков CO₂ с апреля по октябрь за период 2017–2019 гг. Известно, что эти потоки отражают валовое дыхание экосистемы, в котором почвенная составляющая преобладает, составляя, в среднем, за вегетационный сезон 70% [5]. На рис. 3 данные по ночным уровням нетто-потоков CO₂ сопоставле-

ны со средней горизонтальной скоростью ветра. Параметры аппроксимации данных параболической моделью (5) и условные расчетные характеристики газообмена по ним приведены в последней строке таблицы. Высокая достоверность аппроксимации ($R^2 = 0.95$) при небольшой стандартной ошибке ($s = 0.005$) на уровне варьирования данных при осреднении по выборкам ($s = 0.002–0.006$) наряду со статистически-достоверными оценками параметров при допустимых уровнях значимости ($p = 0.005–0.04$), свидетельствуют о применимости модели (5) и к этим наблюдениям. Обращает на себя внимание сходная, как и в результатах по лесостепным черноземам, тенденция постепенного усиления потока до максимальных значений ($Q_{\text{max}} = 297 \pm 53$ мг С/(м² ч)) при критической скорости ветра ($v_{\text{кр}} = 3.2 \pm 0.1$ м/с) с последующим падением до исходного уровня. Более высокие абсолютные значения потоков и соотношения Q_{max}/Q_0 , вероятно, связаны с наложением на почвенное дыхание ночных эмиссионных потоков от наземной растительности. Физически-обоснованные параметры a , m , оцененные условно, без учета сопутствующих растительных потоков, оказались в пределах диапазонов их варьирования в наблюдениях по черноземам. Все вместе свидетельствует в пользу того, что обнаруженные для лесостепных условий физические и экологические закономерности имеют более общий характер.

Сопоставим полученные результаты с известными исследованиями других авторов в этой области. Не вызывает сомнения, что скорость ветра, особенно в открытых ландшафтах с автоморфными, хорошо воздухопроницаемыми почвами, значимо определяет эмиссию и обмен CO₂ и других парниковых газов между почвой и атмосферой [14–16, 18, 19, 22]. Влиянию горизонтальной скорости ветра на поверхностную эмиссию малых газовых составляющих из почвы и механизмам, стоящим за этими процессами, посвящено немало исследований и обзоров. В основном, они основаны на наблюдениях и экспериментах в агроландшафтах и открытых экосистемах (по наибольшей релевантности, согласно поисковой системе “Web of Science” за 1990–2020 г., их не менее 100, что требует отдельного обзора). Однако поиск и оценки формы и параметров этой количественной зависимости продолжают. В частности, Текле с соавт. [22] на основе полевых экспериментов в агроландшафтах делают вывод о том, что по сравнению с “чистой” диффузией по Фику другие процессы (в частности, конвективные) усиливают эмиссию из почвы, рассчитанную по диффузионному градиенту при отсутствии ветра, до 5–10 раз. Для диапазона скоростей ветра 2–4 м/с, авторы экспериментально получили линейную регрессию ($R^2 = 0.14$) с приростом эмиссии 0.03 мг CO₂/(м² ч) на каждый

метр в секунду скорости. В пересчете потока на газообразный углерод и на часовой интервал это дает величину прироста $30 \text{ мг С}/(\text{м}^2 \text{ ч})$, что фактически совпадает с полученной в нашей работе средней оценкой в $31.3 \pm 9.2 \text{ мг С}/(\text{м}^2 \text{ ч})$ на каждый метр в секунду изменений скорости ветра. При этом ряд экспериментальных точек при скоростях $3.5\text{--}4 \text{ м/с}$ лежат ниже регрессионной прямой и средних значений для скорости 3 м/с , указывая на возможность обратной тенденции – понижения эмиссии, не рассматриваемой данными авторами. Экспериментальная работа [19] показывает, что в сухих степных почвах индуцированные ветром изменения давления могут проникать до 50 см , и в дни с растущим атмосферным давлением эмиссия CO_2 снижается, что способствует нетто-поглощению углерода.

В последнее время внимание в этой области распространилось и на высокоярусные сообщества, такие как леса. Исследователи [15] оценили зависимость между скоростью ветра над пологом леса и изменением давления в почве, показав, что этот эффект значим и в лесах, даже при относительно небольшой скорости ветра (1.5 м/с), оцененной над древесным пологом. Ридикер с соавт. [16], используя экспериментальную установку с контролируемой скоростью ветра и давлением, оценили зависимость эмиссии редких почвенных газов из почвы для контрастных типов экосистем (луг, торфяное болото и сосновый лес) при разных режимах влияния ветра и разном давлении на границе почва–атмосфера. Сравнив по отдельности факторы скорости ветра и давления, авторы сделали вывод о том, что скорость ветра – лучший (и более удобный) предиктор эмиссии CO_2 и метана, получив положительную линейную зависимость в диапазоне $0\text{--}3 \text{ м/с}$. Эта же работа привлекает внимание к влиянию времени, прошедшего после прекращения ветра, на скорость эмиссии. По оценкам авторов такое восстановление исходного уровня эмиссии может составить для скорости ветра 3 м/с – около 1 ч. Такое запаздывание, собственно, и позволяет оценивать, как, например, в нашем случае, ветровой эффект с помощью камерного метода. В отношении влияния на оценки эмиссии использования самого камерного метода (в нашем случае с компенсацией давления), а также применения вентиляторов (у нас применялись камеры как с ними, так и без), – то этому посвящено не менее 40 специальных исследований, но здесь все еще нет единого мнения (см. обзоры [16, 17]). Наш многолетний опыт измерений разными CO_2 -анализаторами и типами динамических или статических камер, с вентиляторами и без, показывает, что при небольшой скорости перемешивания воздуха в камере это почти не дает вклада в эмиссию со стороны конвекции, оставляя за диффузией решающую роль.

Возвращаясь к основным результатам, отметим, что в рассмотренных публикациях не было сделано прямых выводов о возможности снижения эмиссионных газовых потоков из почвы при высоких скоростях ветра. Правда, все проанализированные экспериментальные данные касаются лишь диапазона скоростей до $3\text{--}4 \text{ м/с}$, а данные по большим скоростям ветра не обсуждаются. Как уже отмечалось, анализ работы [22] показывает, что при скоростях ветра $2.5\text{--}3 \text{ м/с}$ наблюдается заметное снижение темпов прироста эмиссии, а линейная регрессия общей зависимости может быть, с улучшением качества модели, заменена на обратную параболическую. Работа [16] показывает, что, хотя усиление ветра в диапазоне $0\text{--}3.6 \text{ м/с}$ во всех исследованных типах экосистем приводит к линейному приросту эмиссии биогенных почвенных парниковых газов, при больших скоростях ее прирост начинает постепенно уменьшаться. Кроме того, в этой работе отмечен двойной прирост эмиссии (максимум) при $3\text{--}3.6 \text{ м/с}$, что также отвечает нашим результатам.

Одним из следствий полученных нами результатов является то, что сила влияния скорости ветра на уровень С-обмена почвы и атмосферы должна существенно зависеть от вида и степени использования земель человеком, что обусловлено наличием постоянного или временного растительного покрова, а также агроприемами по обработке почвы, на фоне специфических уровней продукции и диффузии CO_2 из почвенной среды в разных экосистемах. Выявленная в работе эмпирически и теоретически обоснованная количественная зависимость эмиссии CO_2 от действия ветра имеет прямой выход на оценку деградации наиболее активно эксплуатируемых почв, в частности черноземов, а также непосредственное значение для прогноза влияния глобальных климатических изменений на газообмен почв и атмосферы.

ВЫВОДЫ

1. Вынужденная конвекция почвенного воздуха под воздействием ветра является значимым физическим фактором, контролирующим углеродный газообмен почвы и атмосферы.
2. Эмиссионный поток диоксида углерода зависит от горизонтальной скорости ветра нелинейно, через параболическую зависимость с экстремумом (максимумом) при критической скорости ветра $2.8 \pm 0.4 \text{ м/с}$, превышение которой в исследованных ландшафтах сопровождается постепенным сокращением эмиссии до исходного уровня.
3. Предложена физически обоснованная кинетическая модель эмиссионного потока газообразного углерода из почвы под действием ветра,

дающая в качестве решения наблюдаемую экспериментально параболическую зависимость с возможностью усиления до максимума и последующего ослабления эмиссии при скоростях выше критической.

4. Исследование позволило экспериментально оценить соотношение скорости ветра и скорости вынужденной конвекции воздуха в пористой среде почвы безразмерным трансляционным показателем с диапазоном характерных величин $1.6 \times 10^{-6} \pm 7.5 \times 10^{-7}$, указывающим на сильное, порядка миллиона раз снижение скорости конвективного потока воздуха в почве по сравнению с атмосферой.

5. На представительном полевом материале в природных и антропогенных ландшафтах лесостепной черноземной зоны в большом диапазоне варьирования скоростей ветра (0–7 м/с) получено статистически значимое соответствие эмпирического материала предложенной теоретической модели.

6. Конвективный механизм газообмена для почв изученных ландшафтов характеризуется статистически достоверным двукратным усилением эмиссии под действием критической скорости ветра с последующим снижением до исходного уровня при дальнейшем увеличении скорости ветра.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Финансовая поддержка аналитической части работы была оказана со стороны РФФ (мегагрант № 19-77-30012), а полевые оценки эмиссии CO₂ были поддержаны грантом РФФИ (19-29-05025мк). Д.В. Карелин проводил работу в рамках госзадания № 0148-2019-0006 института географии РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белюченко И.С., Смагин А.В., Попок Л.Б., Попок Л.Е. Анализ данных и математическое моделирование в экологии и природопользовании. Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2015. 312 с.
2. Валентини Р., Курбатова Ю.А., Васенев И.И. Информационно-методическое обеспечение регионального мониторинга парниковых газов // Докл. Тимирязевской с.-х. академии. 2012. № 284. С. 212.
3. Карелин Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В., Лунин В.Н., Кудиков А.В. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1354–1366.
4. Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолотчиков Д.Г., Гитарский М.Л. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южно-таежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
5. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / Под ред. Д.Г. Замолотчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова и др. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
6. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Под ред. акад. Г.А. Заварзина. М.: Наука, 2007. 315 с.
7. Смагин А.В. Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 301 с.
8. Смагин А.В. Проблема неучтенного стока углерода и возможная роль гетерофазных физических барьеров в ее решении (краткий аналитический обзор) // Экологический вестник Северного Кавказа. 2020. Т. 16. № 1. С. 4–10.
9. Bogatyrev L.G., Smagin A.V., Akishina M.M., Vityazev V.G. Geographical Aspects of Forest Litters // Moscow University Soil Science Bulletin. 2013. V. 68. № 1. P. 26–31.
10. Bridges E.M., Batjes N.H. Soil gaseous emissions and global climate change // Geography. 1996. V. 81(2). P. 155–169.
11. Dolman H., Shvidenko A. The carbon balance of Russia // Geophysical Research Abstracts. 2013. V. 15. EGU2013-1888-1.
12. Campbell G.S. Soil Physics with BASIC. N.Y.: Elsevier Sci., 1985. 268 p.
13. Keen B.A. The physical properties of the soil. N.Y., Toronto, London: Longmans, Green and Co., 1931. 264 p.
14. Kimball B.A., Lemon E.R. Theory of soil air movement due to pressure fluctuations // Agric. Meteorol. 1972. V. 9. P. 163–181.
15. Mohr M., Laemmel T., Maier M., Schindler D. Analysis of Air Pressure Fluctuations and Topsoil Gas Concentrations within a Scots Pine Forest // Atmosphere. 2016. V. 7. 125 p.
<https://doi.org/10.3390/atmos7100125>
16. Redeker K.R., Baird A.J., Teh Y.A. Quantifying wind and pressure effects on trace gas fluxes across the soil-atmosphere interface // Biogeosciences. 2015. V. 12. P. 7423–7434.
<https://doi.org/10.5194/bg-12-7423-2015>
17. Rochette P. Towards a standard non-steady-state chamber methodology for measuring soil N₂O emissions // Animal Feed Sci. Technol. 2011. V. 166/167. P. 141–146.
18. Roland M., Vicca S., Bahn M., Ladreiter-Knauss T., Schmitt M., Janssens I.A. Importance of nondiffusive transport for soil CO₂ efflux in a temperate mountain grassland. Journal of Geophysical Research // Biogeosciences. 2015. № 120(3). P. 502–512.
<https://doi.org/10.1002/2014JG002788>
19. Sánchez-Cañete E.P., Kowalski A.S., Serrano-Ortiz P., Pérez-Priego O., Domingo F. Deep CO₂ soil inhalation/exhalation induced by synoptic pressure changes and atmospheric tides in a carbonated semiarid steppe // Biogeosciences. 2013. V. 10. P. 6591–6600.
<https://doi.org/10.5194/bg-10-6591-2013>
20. Simunek J., van Genuchten M.Th., Sejna M. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and mul-

- tiple solutes in variably-saturated media. 2006. Technical Manual, Version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.
21. *Smagin A.V.* Kinetic Assessment of Gas Exchange between the Soil and the Atmosphere by the Static Chamber Method // *Eurasian Soil Sci.* 2015. V. 48. № 7. P. 719–725.
<https://doi.org/10.1134/S1064229315070108>
22. *Takle E.S., Massman W.J., Brandle J.R., Schmidt R.A., Zhou X., Litvina I.V., Garcia R., Doyle G., Rice C.W.* Influence of high-frequency ambient pressure pumping on carbon dioxide efflux from soil // *Agricultural and Forest Meteorology.* 2004. V. 124. P. 193–206.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.01.014>
23. *Wesseling J.G.* Soil physical data and modeling moisture flow. Alterra, Wageningen UR, 2009. 178 p.

Wind Footprint in Soil-Atmosphere Gas Exchange

A. V. Smagin^{1, 3, 4} and D. V. Karelin^{2, *}

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Institute of Geography RAS, Moscow, 119017 Russia*

³*RUDN University, Moscow, 117198 Russia*

⁴*Institute of Forest Science RAS, Moscow region., Uspenskoe, 143030 Russia*

*e-mail: dkarelin7@gmail.com

Global climate change in recent decades has been accompanied by rising temperatures and increasing cyclonic activity with strong air flows. How do they affect soil respiration? Is it possible to expect an increase in CO₂ emissions and, consequently, a positive feedback of climate change through the greenhouse effect? These questions cannot be answered without studying the effect of wind speed on the gas exchange between soil and atmosphere in different landscapes. The paper summarizes long-term measurements of CO₂ emissions from forest-steppe chernozems (Kursk region, Russia) in natural and anthropogenic landscapes with forest or herbaceous vegetation depending on wind speed, and presents a physically substantiated approach to its quantitative description. The approach assumes an impact of wind through increased forced convection and turbulent diffusivity, along with a potential reduction of diffusion mass transfer due to a decrease in the gradient of CO₂ concentration between the atmosphere and soil. The obtained inverse parabolic dependence adequately describes the empirical data and assumes a twofold increase of the emission when the wind speed increases to the critical value of 3 m/s and decreases to the initial level when the wind further increases to 6–7 m/s. The intensity of forced convection of soil air turns out to be 5–6 orders of magnitude lower than the wind speed in the atmosphere, but not inferior to the intensity of conventional isothermal diffusion of CO₂, which suggests the importance of taking into account this mechanism in the models of gas exchange between soil and atmosphere.

Keywords: Haplic (or Luvic) Chernozem, CO₂ efflux from soil, wind speed, turbulent diffusivity and forced convection, agrolandscape