

УДК 631.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ФИЗИЧЕСКИ ОБОСНОВАННАЯ МОДЕЛЬ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ВСКРЫТОГО КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ В ВЕЛИКОМ НОВГОРОДЕ

А. В. Смагин^{1,3}, А. В. Долгих², Д. В. Карелин^{1,2,4}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12

²Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

³Институт лесоведения РАН, 143030, Московская обл., пос. Успенское, ул. Советская, 21

⁴Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 117234, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
e-mail: dolgikh@igras.ru

Поступила в редакцию 10.03.2015 г.

Рассматриваются результаты количественной оценки и моделирования эмиссии диоксида углерода из педолитогенной толщи городских отложений в центральной части Великого Новгорода. После вскрытия культурного слоя на начальных этапах измерений выявлены чрезвычайно высокие величины эмиссии, достигающие 10–15 гС/(м² ч), что на два порядка превосходит величину равновесного потока с поверхности почвы. Однако их нельзя отождествлять с высокой биологической активностью погребенных городских отложений. Как показывает модель, основанная на физических процессах, изменения наблюдаемой эмиссии исчерпывающе объясняются дегазацией почвенно-грунтового раствора и десорбцией газа. В модель, наряду с диффузионным механизмом массопереноса диоксида углерода из культурного слоя в атмосферу, заложены неравновесные уравнения межфазных взаимодействий в виде процессов сорбции–десорбции и растворения–дегазации CO₂ с кинетикой первого порядка. С ее помощью при статистически достоверных физических параметрах (эффективном коэффициенте диффузии в зависимости от пористости аэрации, эффективной растворимости и константе Генри для сорбции CO₂, кинетических константах десорбции и дегазации почвенного раствора) удалось воспроизвести тренд динамики эмиссии, совпадающий с экспериментальными данными по оценке потоков CO₂ с поверхности вскрытого культурного слоя камерно-статическим методом.

Ключевые слова: почвенная эмиссия CO₂, десорбция, культурный слой, урбоседименты, моделирование.

DOI: 10.7868/S0032180X16040122

При оценках истинной величины эмиссии CO₂ из почвы, помимо прочего, важно избежать эффекта ее методической стимуляции, связанной с десорбцией молекул в результате искусственных нарушений фазового сложения почвы. При этом часто неясна степень вклада биологических, отвечающих за продукцию этого газа в почве, или физико-химических, отвечающих за его транспорт из почвы, причин наблюдаемых изменений, что важно для понимания и предсказания поведения такой системы в ответ на изменение внешних условий. Опыт такого искусственного усиления эмиссии есть у всех исследователей, проводивших измерения дыхания почв со снятыми верхними горизонтами или суточные измерения углеродного баланса методом закрытых камер с их установкой непосредственно на поверхность почвы [6]. Так, сразу после вкапывания основа-

ний для камер поток газа из почвы (вероятнее всего, в результате десорбции) увеличивается, а затем уменьшается до исходного уровня за 1–3 ч. После удаления верхнего слоя почвы мощностью 5–20 см также всегда наблюдается усиление эмиссии по сравнению с ее уровнем на поверхности до вскрытия (наши наблюдения в арктической и бореальной зонах). Это особо следует учитывать при разовых оценках поверхностных потоков CO₂, чтобы не получить завышения их истинных значений¹, которое, как будет описано

¹ Оговоримся, что под истинным значением мы понимаем общую эмиссию газа из почвы с единицы ее поверхности за год, то есть фактически среднегодовое значение. Такой подход позволяет оптимально учесть все значимые естественные и антропогенные факторы эмиссии и исключить влияние редких флуктуаций на оценку ее средней величины.

ниже, может в максимуме достигать почти 40-кратного. Причинами подобной индуцированной нарушениями почвы эмиссии могут быть физические и физико-химические механизмы, связанные с аккумуляцией CO_2 в нижних слоях (стекание под действием силы тяжести, удаление от поверхности с максимальной интенсивностью газообмена с атмосферой), причем аккумуляция может происходить не только в воздухоносных порах, но и в других физических фазах: жидкой (растворение) и твердой (адсорбция) [11, 14]. Роль подобных факторов абиотической природы в определении дыхания почв по эмиссии CO_2 с поверхности почв показана ранее [15]. В данном исследовании предпринята попытка оценки их значения для вскрытого культурного слоя, находящегося на удалении от поверхности.

Задачи исследования включали: 1) оценку характера и продолжительности эффекта выделения CO_2 из переувлажненных в результате подтопления органических педолитогенных культурных слоев (урбоседиментов) на примере Великого Новгорода; 2) выяснение механизма (физико-химического, биологического или смешанной природы) искусственно индуцированного снятием верхней толщи выделения CO_2 из грунта, состоящего из почвы и педолитогенной толщи. Специфика объекта исследования в виде обогащенных органическим углеродом переувлажненных отложений позволяла надеяться на значительное накопление запасов диоксида углерода в результате процессов его перераспределения и аккумуляции (сорбции, растворения) за предшествующий вскрытию активный период года.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

В качестве объекта количественного изучения индуцированной эмиссии CO_2 был выбран исторический центр Великого Новгорода – одного из важнейших древних городов России, в котором за период с конца IX в. накоплены мощные культурные слои (до 10 м), обогащенные органическим веществом. Поэтому здесь вероятны одни из самых высоких запасов диоксида углерода по отношению к единице площади на суше вообще. Немаловажной причиной выбора объекта послужила также подробная база собранных на нем почвенных данных, что обеспечило возможность моделирования педогенной эмиссии CO_2 [2, 5, 10, 17, 18].

Мощность урбоседиментов в историческом центре Великого Новгорода составляет от 2 до 6 м. В палеодепрессиях отмечается мощность средневекового слоя до 10 м. Город расположен на плоской озерно-ледниковой Приильменской низменности. Климат региона – умеренно-континентальный. Территория находится в зоне западного переноса воздушных масс, интенсивна

циклоническая деятельность. Местный климат – приозерный, более теплый, отмечаются бризы. Температура июля $+17.5^\circ\text{C}$, января -9°C , среднегодовая температура $+3.9^\circ\text{C}$. Безморозный период – 130–150 дней. Годовое количество осадков – 556 мм (максимум в теплый период), испарение – 400 мм/год. Почвообразующие породы – озерно-ледниковые ленточные глины, естественная растительность – смешанные хвойно-широколиственные леса; фоновые почвы – дерново-подзолистые (Retisols) и дерново-поверхностно-элювиально-оглеенные (Planosols) [3, 9, 16].

В целом факторы почвообразования, особенно климат и рельеф, способствуют развитию заболачивания, почвообразование протекает в условиях как кратковременного, так и длительного избыточного увлажнения, что, действуя вместе с давлением вышележащих слоев и постепенном подъеме уровня грунтовых вод вслед за накоплением культурных отложений с высоким содержанием грубого органического вещества (древесной щепы и навоза), приводит к тому, что большая часть урбоседиментов находится ниже уровня грунтовых вод и верховодки [1]. Уровень грунтовых вод и верховодки определяет границу между органоминеральным и органическим слоями. В исторической части Великого Новгорода этот уровень 120–150 см от дневной поверхности, что практически совпадает с глубиной заложения современных инженерных сетей и нормативами глубины промерзания грунта.

В данном случае речь идет о постановке полевого эксперимента в особых условиях. Методика полевых археологических исследований на археологическом раскопе представляет собой послонное (10 см) удаление культурных отложений из разреза с постоянным дренированием переувлажненной толщи. Поэтому здесь возможно как физико-химическое, так и биологическое объяснение наблюдаемой эмиссии, связанное с аэрацией дренированных и свежескритых слоев грунта и активизацией аэробного дыхания почвенной биоты. Заметим, что в данном полевом эксперименте состав почвенной биоты за счет выбора объекта оказался существенно упрощен: в качестве основных потенциальных продуцентов CO_2 здесь присутствуют почти только бактерии, поскольку нет корней высших растений, практически отсутствуют грибы и почвенная зоофауна.

Измерения эмиссии и сопутствующих параметров проводили в сентябре 2014 г. на археологическом раскопе Петро-Павловский (руководитель М.И. Петров, НГООМЗ), расположенном в юго-восточной периферийной части исторического центра Великого Новгорода (58.5109°N , 31.2930°E ; 24 м над ур. м.), состоящим из двух участков общей площадью 300 м². Общая мощность урбоседиментов 1.6–2.3 м, склон палеоре-

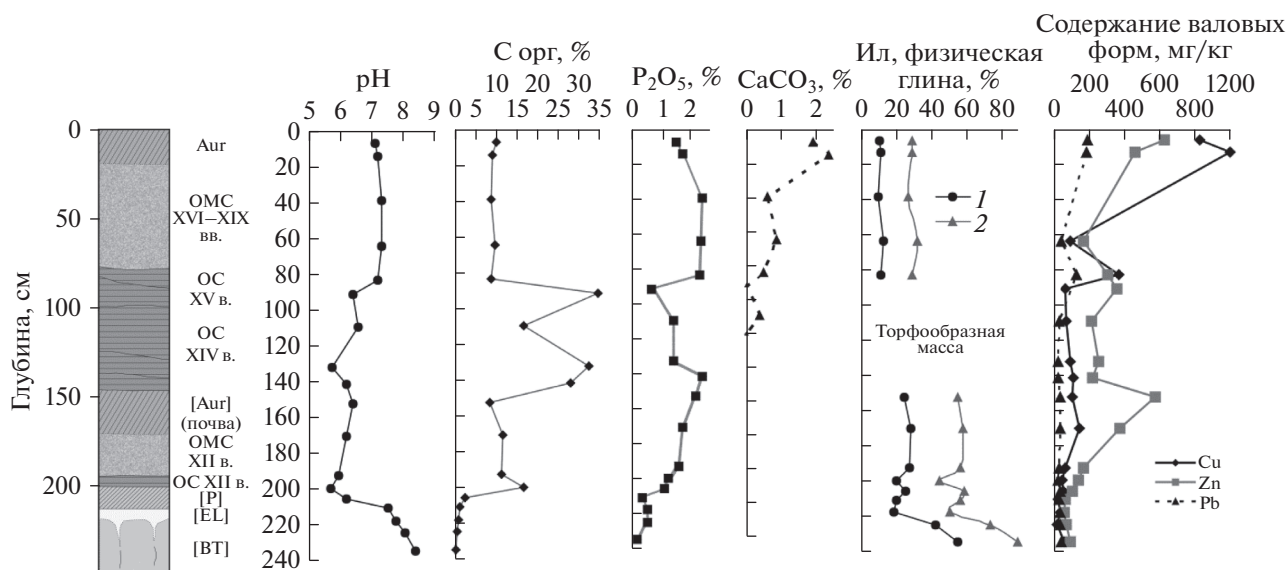


Рис. 1. Основные физико-химические свойства урбоседиментов в периферийной исторической части Великого Новгорода, где производился полевой эксперимент (по [3]); P, BT – индексы почвенных горизонтов по [7]; OMC – органо-минеральный слой, OC – органический слой; 1 – фракция менее 0.001 мм; 2 – фракция менее 0.01 мм.

льефа – с запада на восток. Верхние 1.1–1.3 м урбоседиментов представлены характерным для всего исторического центра Новгорода органо-минеральным слоем XVIII–XX вв., нижняя часть которого также образовалась из нижележащего трансформированного органического слоя. Органо-минеральный слой – супесчаный–легкосуглинистый, с содержанием органического углерода около 10% (рис. 1). Среди включений доминируют обломки кирпичей, известняка. Также эта часть профиля отличается включениями строительной извести, что в значительной степени обуславливает карбонатность и щелочность [5].

Ниже залегают слаботрансформированные культурные отложения XIV–XV вв. мощностью 0.5–1.0 м, являющиеся типичным органическим слоем. Основными слагающими его компонентами являются слаборазложившийся навоз (“торфообразной массы”) и древесная щепа. В этих слоях отмечаются высокое содержание органического углерода (до 35%, местами до 70% при определении потерь при прокаливании) и слабокислые значения pH (до 5.8). Наблюдаемая граница между органическим и органо-минеральными слоями соответствует современной глубине дренированности территории (глубина в данном раскопе 110–130 см).

Для всей толщи урбоседиментов характерны высокие концентрации тяжелых металлов, накопление которых напрямую связано с хозяйственной деятельностью человека на этой территории в прошлом. Отметим экстремальные концентрации валового фосфора во всей толще, причем максимум характерен для средневековых

культурных слоев [5]. Поэтому урбоседименты древних городов являются примером наиболее трансформированных антропогенной деятельностью почвенных систем [18].

Исходная погребенная почва – дерново-подзолистая на ленточных глинах – была практически полностью срезана до материнской породы в XIII в. при строительстве городского вала (датировка М.И. Петрова археологическим методом, личное сообщение).

Археологическая методика исследования органического слоя подразумевает разбор пластов мощностью 10 см на каждом квадрате 2 × 2 м. В среднем за один день происходит выемка одного пласта по всей площади раскопа. Для исследования выбрали ключевой квадрат 2 × 2 м, где установили изолятор в точке с низким содержанием включений древесной щепы. К моменту начала измерений эмиссии CO₂ в течение недели было снято 30 см (3 пласта) органического переувлажненного слоя. После снятия еще 10 см осталось около 40 см данного слоя, из которого предполагалось исследовать эмиссию диоксида углерода.

Измерения эмиссии CO₂ проводили через интервалы 1, 5, 10, 20, 30, 45 мин, а также 1, 2, 5, 20, 24, 48 ч (табл. 1, рис. 2) после установки изолятора, на дне раскопа, на глубине 1.6 м от городской поверхности. Экспозиция при каждом единичном замере эмиссии CO₂ составляла 4 мин, из которых первая минута требовалась для установки равновесия в системе, а 3 мин – для оценки изменений концентрации CO₂. Указанное в табл. 1 время соответствует моменту начала трехминут-

Таблица 1. Изменение почвенной эмиссии CO₂ из погребенной переувлажненной органической толщи сразу после удаления верхнего 10 см слоя

Период экспозиции		Поток CO ₂ , гC/(м ² ч)	Температура, °C			Объемная влажность почвы в слое 0–7 см, %
			воздуха в камере	почвы на глубине 1 см	почвы на глубине 5 см	
Минуты	0 (фон)	0.40	20.0	16.5	13.3	73.5
	1	15.03	20.0	16.5	13.3	73.5
	5	6.69	20.1	16.5	13.3	73.5
	10	4.19	20.0	16.3	13.3	73.5
	20	3.21	20.0	16.1	13.3	73.5
	30	2.46	20.0	15.6	13.3	73.5
	45	2.36	19.9	15.6	13.1	73.5
	60	2.13	19.9	15.5	13.1	73.5
	120	1.14	19.9	15.2	13.3	73.5
	Часы	5	0.36	19.8	15.1	13.4
15		0.18	20.0	13.3	12.5	73.5
20		0.35	20.0	12.8	12.5	73.5
24		0.22	19.8	16.1	13.2	73.5
48		0.41	19.0	16.1	14.3	73.5

ной экспозиции. Концентрацию диоксида углерода оценивали по закрытой схеме с помощью портативного газоанализатора, смонтированного на основе инфракрасного датчика AZ-7752 (AZ Instrument Corp., Тайвань) с разрешением 1 ppm, и минипомпы E 134-11-120 (Hargraves Technologies Corp., США) мощностью 2.0 л/мин. Измерения проводили герметично устанавливая

крышку, смонтированную CO₂-непроницаемыми гибкими трубками в единую систему с газоанализатором, на непрозрачный цилиндрический ПВХ-изолятор диаметром 110 мм. Изолятор во время всего эксперимента был установлен в почву на глубину 3 см. Общий объем закрытой системы составлял 1100 ± 5 см³. Анализатор предварительно откалибровали по высокоточному инфракрасному CO₂-анализатору Li-Cor 6200 (LI-COR Inc., США), обладающим разрешением 0.1 ppm. Между измерениями изолятор из почвы не вынимали. Полностью методика описана ранее [7].

Температуру воздуха в приземном слое и почвы на глубине 1 и 10 см определяли при помощи портативного электронного термометра со встроенным зондом из нержавеющей стали Checktemp-1 (точность 0.1°C; Hanna Instruments, Германия). Объемную влажность почвы в слое 0–7 см оценивали при помощи полевого рефлектометра HH2 Moisture Meter с датчиком ThetaProbe ML2x (точность 1%; Delta-T Devices Ltd., Великобритания). Данные по влажности почвы калибровали гравиметрическим методом. За время проведения опыта температура воздуха и почвы, а также ее влажность оставались практически постоянными.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модель эмиссии CO₂. В основу модели положены следующие предположения. Вскрытый культурный слой содержал значительное количество CO₂, распределенного по физическим фазам (твердой, жидкой и газовой). Поэтому сразу после вскрытия и частичного осушения слоя за счет искусственного дренажа перед началом ар-

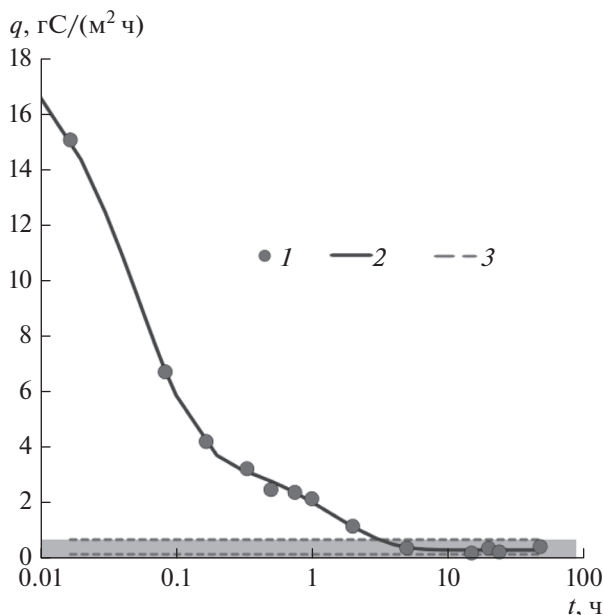


Рис. 2. Результаты моделирования динамики эмиссионного потока CO₂ из вскрытого культурного слоя (Великий Новгород, сентябрь 2014): 1 — реальные данные, 2 — модель, 3 — фоновая эмиссия.

хеологического исследования очередного пласта этот запас дал высокий исходный уровень эмиссии CO₂. Далее во времени поток CO₂ в атмосферу постепенно снижался по мере выхода газа и в конце концов установился на стационарных значениях, соответствующих биологической активности исследуемого слоя. Чтобы воспроизвести описанную картину, воспользуемся следующей физически обоснованной моделью.

Известно, что для большинства почв и грунтов с воздухоносной пористостью доминирующим механизмом массопереноса газа является диффузия [13]. Поэтому в модели было принято, что эмиссия газа осуществляется диффузионным путем с постоянным эффективным коэффициентом диффузии D . О том, что коэффициент постоянен, свидетельствует неизменная объемная влажность исследуемого культурного слоя (73%) на протяжении всего эксперимента по определению эмиссии. Движущей силой эмиссии газов в почвенно-грунтовой толще является градиент концентрации между вскрытым слоем ($C(t)$) мощностью (L) и атмосферой ($C_{атм}$). Тогда предлагаемая модель эмиссии CO₂ имеет вид:

$$|q| = D\Pi_a \frac{dC}{dz} = \frac{D}{L}(C(t) - \Pi_a C_{атм}), \quad (1)$$

где q – искомый эмиссионный поток; Π_a – пористость аэрации (в долях от объема почвы). Используя типичные значения плотности органического оторфованного материала (ρ_b) порядка 0.2 г/см³ и плотности твердой фазы (ρ_s) в 1.6 г/см³, согласно [12], оценим общую пористость по известной формуле [13]

$$ОП = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}. \quad (2)$$

Эта величина составила 88%, или 0.88 долей общего объема почвы. Поскольку величина объемной влажности (θ) непосредственно измерялась в поле и составила 73% (0.73 доли), по разности можно определить долю пор аэрации $\Pi_a = ОП - \theta = 0.15$.

Эффективный коэффициент диффузии в зависимости от пористости аэрации в первом приближении в макропористых средах, какими являются почвенные органогенные материалы, можно рассчитать по уравнению Пэнмена [13]

$$D = 0.66\Pi_a D_0 \left(\frac{T}{273}\right)^n \left(\frac{101.3}{P}\right), \quad (3)$$

где D_0 – стандартный коэффициент диффузии в атмосфере; T – абсолютная температура, К; P – атмосферное давление, кПа; n – эмпирический коэффициент. Для диоксида углерода $D_0 = 1.39 \times 10^{-5}$ м²/с, $n = 1.75$ [13]. Отсюда для имеющейся пористости аэрации при измеренной температуре атмосферы 293 К и нормальном

давлении 101.3 кПа имеем оценку эффективного коэффициента диффузии $D = 0.005$ м²/ч. Характерная мощность слоя, в котором осуществляется диффузионный перенос за время релаксации (выхода основного количества газа из слоя) τ , может быть оценена как [12]:

$$L = \sqrt{D\tau}. \quad (4)$$

Из сопоставления данных фоновой эмиссии (0.13–0.66 г/(м² ч)) и тренда динамики эмиссионного потока на поверхности вскрытого культурного слоя (рис. 1) получаем $\tau \sim 5$ ч. Подставляя в уравнение (4) эту величину наряду с $D = 0.005$ м²/ч, находим $L \sim 0.16$ м. То есть за указанный промежуток времени в атмосферу выходили молекулы CO₂, находящиеся в слое органического урбоседи-мента порядка 16 см.

Объемную долю CO₂ в атмосфере примем постоянной и равной 400 ppm (0.04% по объему). Тогда для известных температурных условий эксперимента можно определить его концентрацию по формуле [13]

$$C = \frac{X\%PM}{100RT}, \quad (5)$$

где $X\%$ – объемное содержание газа, %; M – молекулярная масса, г/м³; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К). Для $X = 0.04\%$ $C_{атм} = 0.73$ г/м³. Имея полученные выше оценки D , L , Π_a и $C_{атм}$, из уравнения (1) легко выразить функцию динамики осредненной концентрации ($C(t)$) в слое L :

$$C(t) = \frac{qL}{D} + \Pi_a C_{атм}. \quad (6)$$

Исходя из материального баланса в урбосе-дimente, величина $C(t)$ будет складываться из фоновой концентрации в газовой фазе (C_g), поддерживаемой биологическим источником, концентрации растворенного (C_l) и адсорбированного (C_s) CO₂ с учетом объемных долей газовой, жидкой и твердой фаз [14]:

$$C(t) = \Pi_a C_g + \theta C_l + (1 - ОП)C_s. \quad (7)$$

Принимая в первом приближении линейные соотношения между фазами в виде соответствующих законов распределения Генри: ($C_l = aC_g$, $C_s = K_r C_g$, где a – растворимость, K_r – константа сорбции газа) и учитывая, что релаксационная кинетика межфазных взаимодействий описывается уравнением реакции первого порядка [13], получаем следующую модель для динамики концентрации $C(t)$:

$$C(t) = C_g(\Pi_a + a\theta + K_r(1 - ОП)) + a\theta(C_0 - C_g)e^{-k_1 t} + K_r(1 - ОП)(C_0 - C_g)e^{-k_2 t}, \quad (8)$$

Таблица 2. Результаты аппроксимации наблюдаемой эмиссии CO₂ уравнением (9)

Параметр	Значения
y_0	8.9 ± 2.1
a	469.6 ± 9.4
k_1	19.2 ± 1.0
c	107.8 ± 6.2
k_2	0.7 ± 0.1
R^2	0.9995
s	4.4

Таблица 3. Физически обоснованные показатели модели (8)

Параметр	Вариант 1	Вариант 2
K_r	1.3	25.4
$k_1, \text{ч}^{-1}$	19.2	0.7
$k_2, \text{ч}^{-1}$	0.7	19.2
$C_g, \text{г/м}^3$	8.5	2.2
$C_0, \text{г/м}^3$	651.8	149.9
$X_g, \%$	0.46	0.12
$X_0, \%$	35.6	8.2

где C_0 – начальная концентрация в газовой фазе урбоседимента (до момента вскрытия слоя и начала эмиссии), k_1 и k_2 – кинетические константы первого порядка дегазации почвенного раствора и десорбции CO₂.

Уравнение (8) можно трансформировать в удобный для проведения аппроксимации вид, делая соответствующую замену параметров:

$$C(t) = y_0 + ae^{-k_1 t} + ce^{-k_2 t}, \quad (9)$$

причем по параметрам a , b , c легко определить физические константы модели и концентрации:

$$K_r = \frac{a\theta c}{(1 - \text{ОП})a}, \quad (10)$$

$$C_g = \frac{y_0}{(\text{П}_a + a\theta(1 + c/a))}, \quad (11)$$

$$C_0 = \frac{a}{a\theta} + C_g. \quad (12)$$

Тогда, аппроксимируя реальные данные в виде расчетной зависимости (6) моделью (9), получаем при известных a , П_a , θ , ОП искомые показатели уравнений (10)–(12), наряду с кинетическими константами релаксации k_1 и k_2 .

Параметры аппроксимации и статистики (уравнение (9)), полученные методом наимень-

ших квадратов с помощью стандартной процедуры нелинейной аппроксимации в программе S-Plot 9 версии, помещены в табл. 2. Как видно, предложенная модель дала адекватное описание тренда с высоким коэффициентом детерминации R^2 , малой ошибкой s и статистически достоверными параметрами модели на высоком уровне значимости с вероятностью альтернативной гипотезы (ошибки) порядка 0.0001–0.003, значительно меньшей по сравнению с обычно принятой в естественных науках величиной 0.05 (95% уровень значимости).

Используя параметры уравнения (9) из табл. 2 и полученные ранее оценки для объемных долей фаз вскрытого слоя ($\text{П}_a = 0.15$, ОП = 0.88, $\theta = 0.73$), а также табличную величину растворимости CO₂, равную при 293 К единице ($a = 1$) [13], по уравнениям (10)–(12) легко определить значения физически обоснованных показателей модели. Эти величины помещены в табл. 3.

Заметим, что, поскольку уравнение (9) симметрично, формально можно получить две пары значений физически обоснованных показателей, рассчитываемых по уравнениям (10)–(12) – варианты 1 и 2 в таблице. Однако по физическому смыслу следует выбрать вариант 2, поскольку он отражает более реалистичные, близкие к известным в физике газовой фазы почв и грунтов значения показателей. Так, для органогенных материалов константа Генри сорбции газов варьирует в пределах 8–40 единиц [11, 14], и величина $K_r = 1.3$ (вариант 1) не укладывается в этот интервал. Кинетические константы растворения (дегазации) должны быть меньше, чем для процесса адсорбции (десорбции) газов [13]. Наконец, пересчет полученных концентраций C_g и C_0 в педолитогенной толще обратно в объемные проценты, согласно уравнению (5), дает для первого варианта слишком высокие значения начального содержания CO₂ ($X_0 = 35.6\%$), маловероятные даже для исходно экранированного и обводненного культурного слоя. Наблюдения за концентрацией CO₂ в природных торфяниках на таких глубинах практически никогда не дают величин больше 10% (~180 г/м³) [12]. Отсюда и по этому критерию вариант 1 следует отвергнуть.

Итак, модель позволила получить физически обоснованные показатели модели динамики концентраций (8) и, соответственно, эмиссионных потоков (1) из вскрытого культурного слоя в предположении об их абиотической природе в виде процессов дегазации почвенно-грунтового раствора и десорбции с твердой фазы. Воспроизведенная по уравнениям (1), (8) с параметрами варианта 2 (табл. 3) кривая динамики эмиссионных потоков полностью соответствовала реальным данным (рис. 2). Расчет общих первоначальных запасов CO₂ по данным о его содержании в

почвенно-грунтовым воздухе (C_0), константам межфазных взаимодействий (K_r , a) и долям фаз (P_a , θ , $1 - \text{ОП}$), согласно уравнению:

$$Z_{\text{CO}_2} = C_0 L (P_a + a\theta + K_r(1 - \text{ОП})), \quad (13)$$

дал величину порядка $100 \text{ г CO}_2/\text{м}^2$ в слое $L = 16 \text{ см}$. При этом $78 \text{ г}/\text{м}^2$, или 78% запаса приходится на адсорбированный воздух (вклад $C_0 L K_r(1 - \text{ОП})$). Этот факт необходимо учитывать при организации работ по изучению круговорота углерода и эмиссии С-газов в почвах и грунтах с высокой удельной поверхностью и большим содержанием органического вещества.

ВЫВОДЫ

1. Почвенно-грунтовая толща городских отложений (культурные слои), представленных органическим торфообразным материалом, накапливает значительные количества диоксида углерода на удалении от поверхности. Благодаря межфазным взаимодействиям этот газ аккумулируется в толще, причем основная его часть фиксируется в адсорбированном виде на поверхности органического материала.

2. Значительный запас накопленного диоксида углерода формирует в начальные моменты после вскрытия культурного слоя чрезвычайно высокие величины эмиссии, достигающие $10-15 \text{ гС}/(\text{м}^2 \text{ ч})$, однако их нельзя отождествлять с усилением биологической активности в результате аэрации почвы, поскольку, как показывает модель, изменения наблюдаемой эмиссии исчерпывающе объясняются дегазацией почвенно-грунтового раствора и десорбцией газа.

3. Поставленный эксперимент и модель могут послужить полезным инструментом анализа в полевых исследованиях, когда требуется оценить возраст выделяющегося из почвы CO_2 *in situ* только по характеру эмиссии.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-31392, 14-05-00347. Авторы выражают признательность М.И. Петрову (с. н. с. ЦОАИ НГООМЗ, г. Великий Новгород) за помощь в проведении полевых исследований и ценные консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский А.Л., Бойцов И.А., Кренке Н.А. Почвы и культурный слой Москвы: строение, история развития, география // Изв. РАН. Сер. геогр. 1997. № 4. С. 82–95.
2. Александровский А.Л., Кренке Н.А., Александровская Е.И., Долгих А.В. Ранняя история почв и ланд-

шафтов древнейших русских городов (к 1150-летию российской государственности) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 2. С. 91–103.

3. География и геология Новгородской области: Уч. пособие. Великий Новгород: Изд-во Новгор. гос. ун-та им. Ярослава Мудрого, 2002. 308 с.
4. Долгих А.В. Почвенно-геохимические исследования культурных отложений Великого Новгорода (Ильменский раскоп) // Российская археология. 2012. № 3. С. 143–148.
5. Долгих А.В., Александровский А.Л. Почвы и культурный слой Великого Новгорода // Почвоведение. 2010. № 4. С. 515–526.
6. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
7. Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 из почв южнотажного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
8. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
9. Матинян Н.Н. Почвообразование на ленточных глинах озерно-ледниковых равнин Северо-Запада России. СПб: Изд-во СПбГУ, 2003. 310 с.
10. Никифорова Е.М., Лазукова Г.Г. Эколого-геохимическая оценка состояния природной среды г. Новгорода // Эко-геохимический анализ техногенного загрязнения. М.: ИМГРЭ, 1991.
11. Смагин А.В. Абиотическое поглощение газов органическими почвами // Почвоведение. 2007. № 12. С. 1482–1488.
12. Смагин А.В. Водно-физические свойства и состав почвенного воздуха и кинетика биодеструкции в верховых торфяниках // Функционирование микробных комплексов верховых торфяников – анализ причин медленной деструкции торфа. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. С. 27–38.
13. Смагин А.В. Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 301 с.
14. Смагин А.В. Газовая функция почв // Почвоведение. 2000. № 10. С. 1211–1223.
15. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Щерба Т.Э., Шнырев Н.А. Абиотические факторы дыхания почв // Экол. вестн. Северного Кавказа. 2010. Т. 6. № 1. С. 5–13.
16. Справочник по климату СССР. Л., 1968. Вып. 3. Ч. IV. 327 с.
17. Alexandrovskaya E.I., Alexandrovskiy A.L., Gaidukov P.G., Krenke N.A. Woodland, meadow, field and town layout: evidence from analyses of the earliest cultural deposits and buried soils in Novgorod // The British Museum. Occasional Paper. 2001. № 141. P. 15–21.
18. Alexandrovskiy A.L., Dolgikh A.V., Alexandrovskaya E.I. Pedogenic Features of Habitation Deposits in Ancient Towns of European Russia and their Alteration under Different Natural conditions // Boletin de la Sociedad Geologica Mexicana. 2012. V. 64(1). P. 71–77.