——— ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ ——

УДК 631.433.3+574.45+551.583

НАТУРНАЯ И МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКИ ДЫХАНИЯ ЛЕСНОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ В ПРИОКСКО-ТЕРРАСНОМ БИОСФЕРНОМ ЗАПОВЕДНИКЕ¹

© 2019 г. И. Н. Курганова^{*a*, *}, В. О. Лопес де Гереню^{*a*}, Т. Н. Мякшина^{*a*}, Д. В. Сапронов^{*a*}, И. В. Ромашкин^{*b*}, В. А. Жмурин^{*a*}, В. Н. Кудеяров^{*a*}

^аИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Россия, 142290, Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2 ^bИнститут леса Карельского научного центра РАН, Россия, 185910, Петрозаводск, Республика Карелия, ул. Пушкинская, 11 *E-mail: ikurg@mail.ru Поступила в редакцию 10.02.2019 г. После доработки 15.04.2019 г. Принята к публикации 05.06.2019 г.

Построение моделей круговорота углерода в лесных экосистемах часто сводится к разработке моделей его основных составляющих – эмиссионной (дыхание почвы и древесного дебриса) и продукционной (депонирование углерода в растительности и почвах). Настоящее исследование было направлено на анализ применимости различных версий *Т&P-модели* для численной оценки месячных, сезонных и годовых потоков СО₂ из дерново-подзолистой почвы в смешанном лесу Приокско-Террасного государственного биосферного заповедника (Московская область). Параметризация модели, ее последующая верификация и оценка точности моделирования проводились на базе данных круглогодичного 20-летнего мониторинга эмиссии СО₂ из почвы с использованием в качестве независимых переменных основных метеорологических характеристик (среднемесячной температуры воздуха и месячной суммы осадков). Численные эксперименты показали, что все версии T& P-модели (исходные и параметризованные на основе обучающих выборок в различных временных интервалах) удовлетворительно описывают многолетнюю временную динамику среднемесячной интенсивности дыхания дерново-подзолистой почвы под лесной растительностью (SRm). Параметризация T& P-модели с использованием экспериментальных данных в качестве обучающих выборок практически не улучшила качество моделирования ни в одном из тестовых интервалов. Использование осредненных за 20 лет метеорологических данных для расчета SRmod-mean и оценки на их основе сезонных и годовых потоков CO₂ из почвы (SeSRmod-mean) в большинстве случаев завышало соответствующие экспериментально полученные величины (SeSRexp). Полученные значения SeSRmod-mean для годового, летнего и зимнего потоков CO₂ из почвы были в среднем на 4.5–6.7% выше, чем SeSRexp, а значения SeSRmod-mean для теплого сезона показали переоценку, составляющую около 3%. Самое значительное несоответствие расчетных оценок экспериментальным данным было выявлено для весеннего периода – завышение составило ~22%. Таким образом, использование осредненных за 20 лет метеорологических данных показало применимость ансамбля из различных версий T&P-модели для оценки сезонных и годовых потоков СО₂ из почвы в условиях умеренно-континентального климата.

Ключевые слова: эмиссия CO_2 из почвы, эмпирическое моделирование, метеорологические характеристики, лесные экосистемы, умеренно-континентальный климат, параметризация, верификация, точность моделирования.

DOI: 10.1134/S002411481905005X

Являясь самыми распространенными наземными экосистемами нашей планеты, леса играют определяющую роль в сохранении биоразнообразия, поддерживая существование более половины всех известных видов растений и животных (Bukvareva et al., 2015; Gauthier et al., 2015; Лукина и др., 2015). В глобальном биогеохимическом цикле углерода (С) роль лесных экосистем не менее значительна: они обеспечивают основную часть стока углерода в наземные экосистемы и рассматриваются сегодня как основные климатостабилизирующие системы земной поверхности (Замолодчиков и др., 2007, 2011, 2018; Le Quere et al.,

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания (рег. № АААА-А18-118013190177-9) и при финансовой поддержке Программы Президиума РАН (рег. № 0191-2019-0045) и РФФИ (проект № 19-04-01282а).

2014; Швиденко, Щепащенко, 2014; Zamolodchikov et al., 2017). Определяющее влияние на функционирование и устойчивость лесных экосистем, включая все составляющие биогенного цикла углерода, оказывают различные факторы внешней среды и прежде всего, климатические (Lal, 2005; Vygodskava et al., 2009; Kurganova et al., 2011b, 2017; Karelin et al., 2017). Лесные экосистемы уникальны по своему многообразию и сложности взаимодействий между их отдельными компонентами. В связи с этим математические модели лесных экосистем достаточно сложны и могут быть представлены как метамодель, т.е. совокупность неких упрощающих методологических принципов (Isaev et al., 2011). Таким образом, в соответствии с представлениями А.С. Исаева, "простейший подход к математическому описанию лесной экосистемы состоит в выделении какого-то одного интересующего исследователей компонента экосистемы и построении модели его динамики" (цит. по: Isaev et al., 2011). Применяя этот принцип, построение моделей круговорота углерода в лесных экосистемах можно свести к разработке моделей его основных составляющих - эмиссионной (дыхание почвы и древесного дебриса) и продукционной (депонирование углерода в растительности и почвах).

Эмиссия СО₂ из почв в лесных экосистемах (или дыхание почвы, SR) характеризуется высокой временной и пространственной вариабельностью (Kurganova et al., 2003, 2011a, 2017; Karelin et al., 2014, 2017; Замолодчиков и др., 2017). Основными абиотическими параметрами, которые контролируют величину эмиссионной составляющей углеродного цикла, являются температура воздуха и почвы, а также уровень увлажнения почв, который в вегетационный период определяется, главным образом, количеством выпадающих осадков (Wang et al., 2010; Осипов, 2013; Song et al., 2014; Liu et al., 2017). На основе анализа данных многолетнего мониторинга эмиссии СО₂ из почв лесных экосистем южного Подмосковья было показано, что главным предиктором месячных потоков СО₂ из почв выступала температура почвы, а основными факторами, контролирующими величину суммарной годовой эмиссии СО₂ из почв, являлась сумма осадков за период весналето (Kurganova et al., 2011а) и величина летнего гидротермического коэффициента (Kurganova et al., 2017).

Экспериментальное определение годовых эмиссионных потоков CO_2 из почв — весьма трудоемкий процесс, и поэтому более рациональным и перспективным способом получения численных оценок дыхания почв является использование математических моделей разной сложности: от простых эмпирических (Reichstein et al., 2003; Kurganova et al., 2011a; Karelin et al., 2014; Иванов и др., 2018) до динамических (Комаров и др., 2007; Чертов, Надпорожская, 2016). Как правило, большинство эмпирических моделей в качестве главного предиктора для численной оценки SR используют температуру почвы или воздуха, а наиболее часто применяемой функцией для оценки температурного отклика дыхания почв в пределах его годовой динамики является функция Вант-Гоффа, именуемая температурным коэффициентом Q₁₀ (Kätterer et al., 1998; Janssens, Pilegaard, 2003). Существуют доказательства, что для одной и той же экосистемы температурный отклик SR (или коэффициент Q₁₀) не является постоянным и зависит от температурного интервала и условий влагообеспеченности, в которых происходило эмпирическое определение SR (Janssens, Pilegaard, 2003; Lopes de Gerenvu et al., 2005; Zheng et al., 2009; Kurganova et al., 2012; Курганова и др., 2018). Другой подход, позволяющий описывать глобальное распределение SR на месячном уровне осреднения с учетом условий влагообеспеченности, был предложен американскими исследователями J. Raich и C. Potter в 1995 г. Это так называемая T&P-модель (Raich, Potter, 1995; Raich et al., 2002), в которой в качестве независимых переменных выступают среднемесячная температура воздуха и месячная сумма осадков. Эта модель в различных модификациях ранее применялась для оценки глобального распределения дыхания почв (Reichstein et al., 2003; Chen et al., 2010; Hashimoto et al., 2015) и практически не использовалась для численной оценки многолетней динамики эмиссии СО₂ из почв в отдельных экосистемах.

Основная цель представляемого исследования состояла в анализе применимости различных версий Т&Р-модели для численной оценки месячных, сезонных и годовых потоков СО₂ из дерново-подзолистой почвы в смешанном лесу Приокско-Террасного биосферного заповедника. Параметризация модели, ее последующая верификация и оценка точности моделирования проводились на базе данных круглогодичного 20-летнего мониторинга эмиссии СО2 из почвы с использованием в качестве независимых переменных основных метеорологических характеристик (среднемесячной температуры воздуха и месячной суммы осадков).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Общая характеристика климата, растительности и почв

Исследования проводили на территории Приокско-Террасного государственного биосферного заповедника (южное Подмосковье; 54°55′ с.ш., 37°34′ в.д.) в смешанном лесу с хорошо развитым травянистым ярусом. Древостой представлен сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), липой мелколистной (Tilia cordata Mill.), тополем дрожащим (*Populus tremula* L.), дубом черешчатым (Quercus robur L.) (4С3Лп2Ос1Б ед Д), возраст которых достигает 90-120 лет. Почва участка дерново-слабо-подзолистая (Retisols). Регион исследований относится к зоне умеренно-континентального климата. Согласно данным многолетних метеонаблюдений (Станция комплексного фонового мониторинга, пос. Данки, Серпуховский район, Московская область), среднегодовая температура воздуха в 1973-2017 гг. в районе исследований составила $5.2 \pm 0.2^{\circ}$ С, а среднегодовое количество осадков - 671 ± 17 мм. Гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) за летний период (июнь – август) варьировал от 0.70 до 2.40, при среднем многолетнем значении 1.50 ± 0.07 .

Исследуемая почва (слой 0–10 см) имеет супесчаный гранулометрический состав (отношение песок : ил : глина = 11.6 : 1.0 : 1.3) и кислую реакцию среды (pH_{KCl} = 3.67 ± 0.02). Содержание органического углерода (C_{орг}) и общего азота (N) невысоко и составляет соответственно 12.2 \pm 2.8 г С кг⁻¹ почвы и 0.96 \pm 0.15 г N кг⁻¹ почвы (отношение C : N = = 15.3). Почва имеет хорошо сформированную подстилку мощностью 2–4 см, запас С в которой составляет 0.58 \pm 0.03 кг С м⁻².

Определение эмиссии СО2 из почвы

Эмиссию CO_2 из почвы (или почвенное дыхание, *SR*) определяли непрерывно, с периодичностью 3–5 раз в месяц в течение 20 лет (1998–2017 гг.) методом закрытых камер, (Lopes de Gerenyu et al., 2001; Kurganova et al., 2003). Расчет эмиссии диоксида углерода из почв производили по формуле:

$$SR = (C_2 - C_1)Ht^{-1},$$
 (1)

где SR — эмиссия CO₂, мг C м⁻² ч⁻¹; C₂ и C₁ — конечная и начальная концентрации CO₂ внутри изолятора, мг C м⁻³; H — высота изолятора над поверхностью почвы, м; t — время экспозиции, час. При расчетах допускалось, что концентрация CO₂ в камере нарастает линейно в первые 30 и 90 мин в теплый (май—октябрь) и холодный (ноябрь—апрель) периоды, соответственно.

Величину среднемесячной интенсивности почвенного дыхания (*SRm*, г С m^{-2} сут⁻¹) рассчитывали как арифметическое среднее из всех измерений, проведенных за каждый месяц. Суммарные месячные потоки CO₂ почв (г С m^{-2} мес⁻¹) рассчитывали с учетом продолжительности соответствующего месяца. Сезонные и годовые потоки CO₂ из почв (season soil respiration, *SeSRexp*, г С m^{-2}) были получены суммированием соответствующих месячных потоков.

ЛЕСОВЕДЕНИЕ № 5 2019

Параметризация моделей для оценки среднемесячной интенсивности выделения CO2 из почв (SRm)

Для численной оценки величины *SRm* использовали нелинейную *T&P-модель*, предложенную J. Raich и C. Potter (1995), в которой независимыми переменными являются среднемесячная температура воздуха (*Ta*, °C) и месячная сумма осадков (*P*, см). Необходимые климатические данные за весь период наблюдений были любезно предоставлены сотрудниками Станции фонового мониторинга (местечко Данки-Заповедник, Серпуховский район, Московская обл.), расположенной на территории Приокско-Террасного заповедника.

T&P-модель для оценки среднемесячной интенсивности выделения CO₂ из почв (*SRm*, г C м⁻² сут⁻¹) на основе среднемесячной температуры воздуха (*Ta*, °C) и суммы осадков за соответствующий месяц (*P*, см) имеет следующий вид (Raich and Potter, 1995):

$$SRm = R_0 e^{QTa} \left(P/(K+P) \right), \tag{2}$$

где R_0 (г С м⁻²сут⁻¹) – дыхание почвы при 0°С в отсутствие лимитирования влаги; Q (°С⁻¹) – экспоненциальное отношение между почвенным дыханием и температурой, а K (см) – константа полунасыщения в гиперболическом отношении между *SRm* и месячным количеством осадков. Первоначально были предложены следующие параметры модели (*T&P-1*; Raich and Potter, 1995): $R_0 = 1.334$ г С м⁻² сут⁻¹, $Q = 0.0399^{\circ}$ С⁻¹ и K = 1.634 см. В следующей версии (*T&P-2*; Raich et al., 2002) значение параметра R_0 незначительно уменьшилось (табл. 1), но существенно увеличились параметры Q (~ в 1.4 раза) и K (~ в 2.6 раза).

Полученный массив эмпирических данных (генеральная совокупность), на которых проводилась параметризация T&P-модели и ее последующее тестирование включал в себя 240 записей (12 мес. × 20 лет) и разбивали на 2 обучающие выборки, по 120 записей каждая, которые соответствовали 2-м временным периодам: 1998—2007 гг. и 2008—2017 гг. Отдельно для каждой из этих выборок вычисляли параметры R_0 , Q и K (версии T&P-3", табл. 1) с использованием программы R (R Core Team, 2018).

Оценка точности моделирования среднемесячного дыхания почв SRm

Массивы данных, которые не входили в обучающую выборку, перекрестно использовали в качестве тестовых выборок, которые служили для проверки репараметризованных версий *T&P-мо-дели* (*T&P-3' и T&P-3''*). Исходные версии *T&P-1* и *T&P-2* тестировали как на общей совокупности эмпирических данных, так и поочередно для указанных выше временных интервалов (1998–2007)

| Модель | R _o | Q | K | Источник |
|-------------------|----------------|--------|-------|------------------------------|
| Т&Р-1 | 1.334 | 0.0399 | 1.634 | Raich, Potter, 1995 |
| <i>T&P−2</i> | 1.250 | 0.0545 | 4.259 | Raich et al., 2002 |
| <i>T&P-3'</i> | 1.162 | 0.0509 | 1.501 | Обучающая выборка, 1998-2007 |
| <i>T&P-3"</i> | 0.961 | 0.0481 | 1.496 | Обучающая выборка, 2008—2017 |

Таблица 1. Исходные (Raich, Potter, 1995; Raich et al., 2012) и скорректированные на основе обучающих выборок параметры для различных версий *T&P-модели*

и 2008—2017 гг). Оценка точности моделирования величины SRm проводилась с помощью "коэффициента несовпадения" Тейла (Т) в соответствии с формулой (Шитиков и др., 2003):

$$T = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (X_{\text{pean}} - X_{\text{модел}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_{\text{pean}}^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_{\text{модел}}^2}},$$
(3)

где $X_{\text{реал}}$ — реальные (измеренные) значения месячных потоков CO₂, а $X_{\text{модел}}$ — смоделированные (рассчитанные) величины *SR*. Значения коэффициента T лежат в диапазоне [0; 1], и чем ближе коэффициент T к нулю, тем точнее моделирование. При исследовании природных процессов порог его значимости составляет 0.3 (Тейл, 1971). Т.е. результаты моделирования следует признать правомерными при T \leq 0.3.

Другими показателями точности моделирования служили также: доля объясненной дисперсии (или коэффициент детерминации, R^2) и регрессионный коэффициент (множитель при независимой переменной, позволяющий оценить насколько модель недооценивает или переоценивает экспериментальные данные), определенные методом наименьших квадратов. Т.е. при достаточно высоких значениях R^2 , но величинах регрессионного коэффициента, значительно отличающегося от 1, работу модели нельзя признать удовлетворительной.

Точность оценки сезонных и годовых потоков CO₂ из почвы

По аналогии с экспериментальными данными, оценки сезонных и годовых потоков CO_2 из почв (*SeSRmod*, г С м⁻²) были получены на основании вычисленных с помощью различных версий *T&P-модели* месячных потоков CO_2 из почв (*SRmod*, г С м⁻² мес⁻¹) простым суммированием за соответствующие месяцы. Точность оценки (*precision assessment, PrAs, %*) суммарных потоков CO_2 за отдельные периоды мы определяли по величине относительной разницы между оценками (вычисленными значениями) *SeSRmod* с помощью различных версий *T&P-модели* и экспериментально определенной величиной (*SeSRexp*):

$$PeAs(\%) = (SeSRmod -$$

- SeSRexp)/SeSRexp × 100%. (4)

Отрицательные значения величины *PrAs* соответствуют недооценке *SeSRexp* с помощью той или иной версии модели, а положительные — свидетельствуют о переоценке *SeSRexp*.

Кроме того, оценка сезонных и годовых потоков CO₂ из почв (*SeSRmod-mean*, г C м⁻²) была выполнена на основе вычисления *SRm* с помощью 4-х версий *T&P-модели* и использования в качестве независимых переменных усредненных значений метеорологических параметров (*Ta-mean и P-mean*) за тот же временной период, когда проводились экспериментальные наблюдения, т.е. за 1998–2017 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Временная неоднородность месячных, сезонных и годовых потоков CO₂ из дерново-подзолистой почвы.

Многолетние наблюдения за эмиссией углекислого газа из дерново-подзолистой почвы позволили не только охарактеризовать величину месячных, сезонных и годовых потоков СО₂, но и провести детальный статистический анализ их временной динамики (табл. 2). Учитывая, что в зоне умеренно-континентального климата температурный фактор определяет внутригодовую динамику дыхания почв, то вполне ожидаемо, что минимальные величины месячных потоков СО2 из почв были характерны для всех зимних месяцев и марта и составляли 14.4—18.7 г С м $^{-2}$ мес $^{-1}$. В летний период эмиссия СО $_2$ из почв была в 3—5 раз выше, достигая максимальной величины (72.2 г С м⁻² мес⁻¹) в июле месяце, когда наиболее благоприятно (в среднем) складывались погодные условия для функционирования микробных сообществ и имел место активный дыхательный процесс корневых систем высших растений. Самая высокая межгодовая вариабельность (CV) месячных потоков СО₂ из почв регистрировалась с декабря по март (CV = 44 - 55%), что связано с высокой межгодовой динамичностью погодных условий (температурный режим, время установления и разрушения снегового покрова) в регионе исследований в этот период года в последние десятилетия

НАТУРНАЯ И МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКИ ДЫХАНИЯ

| Период | Мин. | Макс. | Размах | Медиана | Среднее | STD** | SE | CI | CV, % | |
|--|------|-------|----------|-----------|--|--------------------|-----|------|-------|--|
| Месячные потоки CO_2 , г C м ⁻² месяц ⁻¹ | | | | | | | | | | |
| Январь (I) | 5.4 | 40.9 | 35.5 | 16.2 | 17.7 | 9.8 | 2.1 | 4.6 | 55 | |
| Февраль (II) | 4.3 | 32.5 | 28.2 | 14.3 | 14.4 | 6.3 | 1.4 | 3.0 | 44 | |
| Март (III) | 2.2 | 33.1 | 31.0 | 16.0 | 17.0 | 8.6 | 1.9 | 4.0 | 51 | |
| Апрель (IV) | 15.2 | 34.5 | 19.2 | 23.7 | 24.4 | 5.9 | 1.3 | 2.7 | 24 | |
| Май (V) | 22.3 | 73.3 | 50.9 | 42.9 | 44.2 | 13.8 | 3.0 | 6.4 | 31 | |
| Июнь (VI) | 36.8 | 89.5 | 52.7 | 49.3 | 56.0 | 17.3 | 3.8 | 8.1 | 31 | |
| Июль (VII) | 37.1 | 110.3 | 73.2 | 75.8 | 72.2 | 19.5 | 4.3 | 9.1 | 27 | |
| Август (VIII) | 24.8 | 101.2 | 76.5 | 59.3 | 61.8 | 23.8 | 5.2 | 11.1 | 39 | |
| Сентябрь (IX) | 23.8 | 65.7 | 41.9 | 47.8 | 47.9 | 14.2 | 3.1 | 6.6 | 30 | |
| Октябрь (Х) | 17.8 | 59.2 | 41.4 | 39.6 | 38.9 | 13.0 | 2.8 | 6.1 | 33 | |
| Ноябрь (XI) | 12.5 | 38.6 | 26.1 | 24.4 | 24.1 | 7.5 | 1.6 | 3.5 | 31 | |
| Декабрь (XII) | 6.6 | 34.4 | 27.8 | 15.8 | 18.7 | 8.8 | 1.9 | 4.1 | 47 | |
| | | | Сезонные | потоки СС | О ₂ , г С м ^{−2} с | езон ⁻¹ | | | | |
| Зима (XII, I–II) | 19 | 106 | 87 | 47 | 51 | 18 | 4 | 9 | 36 | |
| Весна (III–V) | 46 | 130 | 85 | 85 | 86 | 22 | 5 | 10 | 26 | |
| Лето (VI-VIII) | 121 | 301 | 180 | 186 | 190 | 51 | 11 | 24 | 27 | |
| Осень (IX-XI) | 59 | 163 | 103 | 115 | 111 | 30 | 7 | 14 | 27 | |
| Холодный (XI–IV) | 68 | 192 | 123 | 114 | 116 | 29 | 6 | 13 | 25 | |
| Теплый (V–X) | 216 | 492 | 276 | 321 | 321 | 77 | 17 | 36 | 24 | |
| Годовой (I-XII) | 305 | 630 | 326 | 452 | 437 | 93 | 20 | 43 | 21 | |
| Доля сезонных потоков по отношению к годовому, % | | | | | | | | | | |
| Зима (XII, I–II) | 4 | 18 | 14 | 11 | 12 | 3.2 | 0.7 | 1.5 | 27 | |
| Весна (III–V) | 13 | 29 | 16 | 19 | 20 | 4.5 | 1.0 | 2.1 | 23 | |
| Лето (VI-VIII) | 32 | 54 | 22 | 43 | 43 | 4.8 | 1.0 | 2.2 | 11 | |
| Осень (IX-XI) | 16 | 38 | 22 | 24 | 25 | 5.1 | 1.1 | 2.4 | 20 | |
| Холодный (XI-IV) | 15 | 34 | 19 | 27 | 27 | 4.8 | 1.1 | 2.3 | 18 | |
| Теплый (V–X) | 66 | 85 | 19 | 73 | 73 | 4.8 | 1.1 | 2.3 | 7 | |

Таблица 2. Основные статистические параметры*, характеризующие временную вариабельность месячных, сезонных и годовых потоков CO₂ из дерново-подзолистой почвы и долю сезонных потоков по отношению к годовому

* Основаны на данных 20-летнего мониторинга;

** STD – стандартное отклонение, SE – стандартная ошибка среднего; CI – доверительный интервал среднего, CV – коэффициент вариации.

(Курганова и др., 2017). Межгодовая вариабельность месячных потоков CO_2 в остальные месяцы года составляла 24—33% (табл. 3), и только в августе была чуть выше (39%), что вполне объяснимо влиянием летних засух, повторяемость которых за последние 20 лет, совпадающих с периодом наблюдений за потоками CO_2 из почв, существенно возросла (Курганова и др., 2017).

Среднемноголетние суммарные потоки CO_2 из почв в летний сезон были почти в 4 раза выше зимних (190 против 51 г С м⁻² сезон⁻¹). Осенние потоки CO_2 из почв превышали весенние в 1.3 раза, что объясняется активным разложением опада в октябре-ноябре, пролонгированием бесснежного периода и наиболее выраженным трендом увеличения температуры воздуха именно в осенние месяцы (~1.2°С за 10 лет) по сравнению со всеми остальными сезонами за годы наблюдений (Курганова и др., 2017). Межгодовая вариабельность зимних потоков CO_2 из почв была самой высокой и составляла 36%,

ЛЕСОВЕДЕНИЕ № 5 2019

а во все остальные сезоны года она изменялась от 24 до 27% (табл. 3). Среднемноголетний годовой поток CO_2 из супесчаной дерново-подзолистой почвы составлял 437 ± 20 г С м⁻² год⁻¹, а его межгодовая вариабельность, обусловленная различиями в погодных условиях, равнялась 21%.

Анализ доли сезонных потоков по отношению к годовому в многолетней динамике показал, что вклад зимнего сезона в годовой поток CO_2 из почв в среднем составляет 12%, а летнего – немногим меньше половины – 43%. При этом доля летних потоков варьировала незначительно (CV = 11%), а изменчивость вклада зимнего сезона была максимальной – 27%. На долю весеннего и осеннего сезонов приходилось соответственно 1/5 и 1/4 часть от годовой эмиссии CO_2 , а вариабельность этих долей составляла 20–23%. Менее всего была подвержена влиянию погодных условий доля теплого периода (май–октябрь) в годовом потоке CO_2 из почв (CV = 7%).

| Параметр | Τ& | P-1 | Τ& | P-2 | <i>T&P-3"</i> | <i>T&P-3'</i> |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|-------------------|
| | 1998-2007 | 2008-2017 | 1998-2007 | 2008-2017 | 1998-2007 | 2008-2017 |
| R^2 | 0.72 | 0.64 | 0.72 | 0.64 | 0.74 | 0.65 |
| а | 1.01 | 0.73 | 0.64 | 0.5 | 1.31 | 0.76 |
| Т | 0.180 | 0.167 | 0.191 | 0.274 | 0.181 | 0.188 |

Таблица 3. Доля объясненной дисперсии (*R*²), регрессионные коэффициенты (*a*) и коэффициент несовпадения Тэйла (T) для различных версий *T&P-модели* и двух тестовых выборок: 1998–2007 и 2008–2017 гг.

Тестирование и точность различных версий Т&Р модели для оценки SRm

Вычисленные на основе экспериментальных данных в различных обучающих выборках параметры для Т&Р-модели, имели довольно близкие значения и более всего отличались по величине R_0 (табл. 1): для второй обучающей выборки (2008-2017 гг.) величина этого параметра была на 20% меньше, чем для первой обучающей выборки (1998-2007 гг.). Ранее мы отмечали, что в последние 2 декады (1998-2017 гг.) в регионе исследований наблюдалось усиление засушливости климата (Курганова и др., 2017), которое явилось основной причиной негативных трендов изменения летних и годовых потоков СО2 из дерново-подзолистой почвы под лесом (Kurganova et al., 2017). По-вилимому, именно эта тенленция явилась причиной выявленных различий в величине параметра R_0 между 2-мя обучающими выборками. Вычисленные на основе экспериментальных ланных параметры модели для версий Т&Р-3' и Т&Р-3" вместе с тем наиболее существенно отличались от исходной Т&Р-1 версии по величине температурного коэффициента Q, а от версии T&P-2 по величине коэффициента К, отвечающего за связь с осалками.

Проведенные численные эксперименты показали, что для всего объема экспериментальных данных различные исходные версии T&P-модели адекватно описывают среднемесячную интенсивность дыхания дерново-подзолистой почвы под пологом смешанного леса (рис. 1). И хотя предложенные версии могли как переоценивать (обычно в зимние месяцы), так и недооценивать (обычно в зимние месяцы), так и недооценивать (в летний период), экспериментально полученные величины *SRm*, внутри- и межгодовая динамика эмиссии CO₂ из почв в целом отражалась верно, а значения *T* не превышали 0.3. При этом 1-я версия *T&P-модели* демонстрировала более высокую точность (*T* = 0.167) по сравнению с более поздней версией *T&P-2* (*T* = 0.237).

В рамках настоящего исследования мы также оценили точность исходных версий – T&P-1 и T&P-2, и версий, параметризованных на основе экспериментальных данных – T&P-3' и T&P-3''для тестовых выборок, включающих результаты измерений за 1998–2007 и 2008–2017 гг. (рис. 2, табл. 3). Все версии T&P-modenu продемонстрировали вполне удовлетворительное качество соответствия расчетных данных экспериментальным — коэффициент T не превышал критическую величину 0.3. Самую высокую точность моделирования показала версия T&P-I, а параметризация существующих версий T&P-Modenu практически не улучшила качество моделирования ни в одном из тестовых интервалов (табл. 3). Версия T&P-2 показывала самое низкое соответствие расчетных и экспериментальных данных (T = = 0.191-0.274), сильно завышая результаты измерений.

Доля объясненной дисперсии была незначительно выше при тестировании всех версий *T&Pмодели* на первом массиве данных (рис. 2а) по сравнению со вторым (рис. 2б). Распределение остатков, представляющих разницу между *SRexp* и *SRmod*, несмотря на их высокий разброс, не имело ярко выраженной зависимости от *SRmod*, что позволяет сделать вывод, о пригодности всех версий *T&P*-*модели* для численной оценки *SRm* на основании основных климатических параметров – *Ta* и *P*.

Таким образом, проведенные численные эксперименты позволяют заключить, что все версии Т&Р-модели (исходные и параметризованные на основе обучающих выборок в различных временных интервалах) могут быть успешно использованы для оценки многолетней временной динамики среднемесячной интенсивности дыхания дерновоподзолистой почвы под лесной растительностью. В работе китайских исследователей (Chen et al., 2009) параметризованные версии Т&Р-модели применялись для оценки пространственного распределения величины годового дыхания почв с использованием среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков в качестве независимых переменных. Авторы показали применимость этих моделей для всех типов экосистем (агро-, лесных и луговых). Наибольшее соответствие экспериментальных данных модельным расчетам было получено для луговых ценозов ($R^2 = 0.51$), а наименьшее — для лесных экосистем ($R^2 = 0.31$). Введение в исходную модель дополнительного параметра, позволяющего учесть запасы углерода в почве (Т&Р&С-модель), позволило существенно улучшить результаты моделирования годовых потоков CO₂ из почв во всех типах экосистем (Chen



Рис. 1. Многолетняя динамика экспериментально определенных величин среднемесячной интенсивности дыхания почв (*SR*) и соответствующие им расчетные оценки, выполненные на основе исходных версий *T&P-моделей*: T&P-1 (A) и T&P-2 (Б). 1 – *SRexp*; 2 – *SRmod* по версии *T&P-1*; 3 – *SRmod* по версии T&P-2.

еt al., 2010). Однако обращает на себя внимание, что в исходных версиях T&P-modenu, предложенных J. Raich с соавт. (Raich, Potter, 1995; Raich et al., 2002), параметр R_0 , отражающий интенсивность дыхания почвы при среднемесячных температурах, близких к нулевым отметкам, косвенно зависит от обеспеченности почвы органическим веществом и его биодоступности.

Точность оценки сезонных и годовых потоков, полученных на основе среднемесячных значений SRm, определенных при помощи разных версий T&P-модели, и экспериментальных измерений

Соответствие оценок сезонных и годовых потоков CO₂ из почв, полученных на основе различных версий *T&P-модели*, экспериментальным данным за 20-летний период наблюдений, зависело от применяемой версии модели, временного периода, для которого проводили расчеты, и года исследований (рис. 3). Экстремальное несоответствие расчетных данных экспериментальным все тестируемые версии *T&P-модели* показали для зимнего и холодного периодов. Переоценка суммарных зимних потоков в отдельные годы могла

ЛЕСОВЕДЕНИЕ № 5 2019

достигать 142 и 267% для холодного и зимнего периодов, соответственно, а их экстремальная недооценка была существенно ниже и составляла 30-56% - для зимнего сезона и 14-45 - для холодного периода (рис. 3). Учитывая невысокую долю зимнего периода в годовом потоке СО₂ из почв (табл. 1), отмеченные несоответствия, не будут столь заметно отражаться на расчетных значениях суммарного годового дыхания дерново-подзолистой почвы в целом. Наибольшую сходимость расчетных и экспериментальных значений показывали потоки СО2 из почв в летний, теплый и годовой периоды, для которых экстремальные несоответствия в отдельные годы составляли не более 60-80%. Во все сезоны года экстремальная переоценка потоков была обычно более выражена, чем их недооценка (рис. 3).

В рамках нашего исследования было проведено сравнение среднемноголетних экспериментально определенных значений сезонных и годовых потоков CO₂ из почв (на основе 20-летних наблюдений) и среднемноголетних оценок, выполненных на основе различных версий *Т&P-модели* и метеорологических параметров за тот же период (табл. 4). Показано, что точность оценок, полученных с помощью



Рис. 2. Соответствие расчетных оценок (*SRmod*) экспериментально определенным величинам среднемесячной интенсивности дыхания почв (*SRexp*) и распределение остатков, полученные на основе различных версий *T&P-модели* для разных тестовых выборок: 1998–2007 гг. (а, б) и 2008–2017 гг. (в, г). 1 – *T&P-1*; 2 – *T&P-2*; 3 – *T&P-3''*1; 4 – *T&P-3'*.



Рис. 3. Экстремальные несоответствия суммарных расчетных оценок *SeSRmod* в различные периоды года, полученных с помощью ансамбля *T&P-моделей*, экспериментально определенным величинам сезонных и годовых потоков CO₂ из почв (*SeSRexp*) в 1998–2017 гг. Несоответствия представлены как разница между *SeSRmod* и *SeSRexp* за определенный период, отнесенная к величине *SeSRexp* и выраженная в %. Отрицательные значения соответствуют максимальной недооценке *SeSRexp*, а положительные – максимальной переоценке *SeSRexp*.

версий T&P-1 и T&P-3', была самой низкой для холодного, зимнего и весеннего периодов: названные версии T&P-модели переоценивала величины этих потоков CO₂ из почв на 40–46% и 24–17%, соответственно (табл. 4). Во все остальные периоды года соответствие среднемноголетних экспериментальных значений *SeSRexp* расчетным величинам *SeSRmod* было достаточно высоким и

Таблица 4. Точность оценки (*PrAs*) разных версий *T&P-модели* для расчета среднемноголетних сезонных и годовых потоков CO₂ (*SeSRmod*, г C м⁻²) из дерново-подзолистой почвы Приокско-Террасного биосферного заповедника

| Периол | Показатель | | Версия Та | & Р-модели | Среднее* | | $S_a S P_{aven} \pm CI^{**}$ | |
|----------|-----------------------------------|-------|------------------|-------------------|-------------------|-------|------------------------------|-------------------------|
| период | | T&P-1 | <i>T&P−2</i> | <i>T&P-3'</i> | <i>T&P−3"</i> | (1) | (2) | $Sestexp \perp CI^{++}$ |
| Годовой | <i>SeSR</i> , г С м ⁻² | 488 | 390 | 485 | 390 | 439 | 438 | 437 ± 43 |
| | PrAs, % | 16 | -8 | 15 | -7 | 0.4 | 0.2 | |
| Теплый | SeSR, $\Gamma C M^{-2}$ | 333 | 291 | 348 | 276 | 312 | 312 | 321 ± 36 |
| | PrAs, % | 9 | -5 | 14 | -10 | -2.9 | -2.9 | |
| Холодный | <i>SeSR</i> , г С м ⁻² | 156 | 99 | 138 | 114 | 127 | 127 | 116 ± 13 |
| | PrAs, % | 41 | -11 | 25 | 3 | 9.4 | 8.8 | |
| Зима | <i>SeSR</i> , г С м ⁻² | 66 | 40 | 56 | 47 | 53 | 52 | 51 ± 9 |
| | PrAs, % | 48 | -11 | 24 | 4 | 4.6 | 2.7 | |
| Весна | SeSR, $\Gamma C M^{-2}$ | 114 | 85 | 111 | 90 | 99 | 100 | 86 ± 10 |
| | PrAs, % | 40 | 3 | 37 | 11 | 16.0 | 16.6 | |
| Лето | <i>SeSR</i> , г С м ⁻² | 194 | 180 | 209 | 165 | 187 | 187 | 190 ± 24 |
| | PrAs O, % | 8 | -1 | 17 | -8 | -1.5 | -1.5 | |
| Осень | SeSR, $\Gamma C M^{-2}$ | 114 | 85 | 109 | 89 | 99 | 99 | 111 ± 14 |
| | PrAs, % | 11 | -17 | 7 | -13 | -10.3 | -10.5 | |

* (1) — среднее значение для версий T&P-1 и T&P-2 (исходные версии T&P-модели), (2) — среднее значение для всех четырех версий T&P-модели; **CI — доверительный интервал среднегог (confidence interval).

величина *PrAs* обычно не превышала 15–17%. Так, например, качество численной оценки годовых потоков CO₂ из дерново-подзолистых почв с использованием всех версий *T&P-модели* было вполне удовлетворительным и отклонение от среднемноголетней экспериментально полученной величины (437 ± ± 21 г С м⁻² год⁻¹) составляло от -7 до 16% (табл. 4). Т.е. одни версии *T&P-модели* как другие – недооценивать.

Поэтому, в дополнение мы провели сравнение величин SeSRexp со средними оценками сезонных и годовых потоков CO₂ из почвы SeSRmod, полученных на основе ансамбля из всех четырех версий Т&Р-модели и отдельно только двух исходных версий (Т&Р-1 и Т&Р-2). Точность этих средних оценок была практически одинаковой (табл. 4) и очень оптимистичной. Так. осредненные значения SeSRmod для суммарного годового потока СО₂ из почвы практически полностью совпали с SeSRexp, значения SeSRmod для летнего и теплого сезонов показывали незначительную недооценку, составляющую 1.5 и 2.9%, соответственно. Самое значительное несоответствие расчетных оценок экспериментальным данным было выявлено для весеннего (переоценка ~16%) и осеннего (недооценка ~10%) сезонов.

Таким образом, мы можем заключить, что 20-летний период наблюдений охватил все многообразие внутригодовых климатических условий, представляющих собой разные сочетания по теплообеспеченности и увлажненности, как на

ЛЕСОВЕДЕНИЕ № 5 2019

месячном уровне осреднения, так и на сезонном и годовом. Работа всех тестируемых версий T&P-модели для оценки сезонных и годовых потоков CO_2 из дерново-подзолистой почвы в разные по климатическим условиям годы могла быть, как и очень низкой (рис. 3), так и достаточно высокой. Особенно хорошую степень соответствия экспериментальным данным демонстрировали средние оценки сезонных и годовых потоков CO_2 из почвы SeSRmod, полученные на основе ансамбля из всех 4-х версий T&P-модели и отдельно только двух исходных версий (T&P-1 и T&P-2).

Наибольшую востребованность для определения баланса углерода во всех экосистемах (и в лесных, в частности) представляет годовой поток СО₂ из почвы. Наши расчеты позволяют заключить, что в условиях умеренно-континентального климата в отсутствие экспериментально полученных данных по определению эмиссии СО2 из почв, для определения суммарных сезонных и годовых потоков можно рекомендовать одновременное использование двух исходных версий Т&Р-модели. Проведение поочередных расчетов на базе 20-летнего ряда метеорологических данных и последующее осреднение полученных величин позволит получить экспертные оценки годовых и сезонных потоков СО₂ из почв. Сегодня климатические данные, требуемые для работы *Т&Р-модели*, находятся в открытом доступе и, поэтому, проведение расчетов, описанных выше, можно выполнить и за более длительные временные периоды.

КУРГАНОВА и др.

| | | - | * * | | | | | |
|----------|-----------------------------------|------------------|------------------|-----------|--------|-------|----------------------------|-------------------------|
| Период | Показатель | | Версия Та | &Р-модели | Сред | цнее* | $S_a S P_{aven} + CI^{**}$ | |
| | | <i>T&P−1</i> | <i>T&P−2</i> | Т&Р-З′ | T&P-3" | (1) | (2) | $Sestexp \perp CI^{**}$ |
| Годовой | <i>SeSR</i> , г С м ⁻² | 512 | 415 | 508 | 408 | 464 | 461 | 437 ± 43 |
| | PrAs, % | 17.2 | -5.0 | 16.1 | -6.6 | 6.1 | 5.4 | |
| Теплый | SeSR, $\Gamma C M^{-2}$ | 351 | 313 | 366 | 291 | 332 | 330 | 321 ± 36 |
| | PrAs, % | 9.4 | -2.5 | 13.9 | -9.5 | 3.4 | 2.8 | |
| Холодный | SeSR, $\Gamma C M^{-2}$ | 161 | 102 | 142 | 118 | 132 | 131 | 116 ± 13 |
| | PrAs, % | 38.7 | -11.9 | 22.0 | 1.3 | 13.4 | 12.5 | |
| Зима | SeSR, $\Gamma C M^{-2}$ | 68 | 40 | 57 | 48 | 54 | 53 | 51 ± 9 |
| | PrAs, % | 33.7 | -20.3 | 11.2 | -6.3 | 6.7 | 4.6 | |
| Весна | SeSR, $\Gamma C M^{-2}$ | 119 | 89 | 116 | 94 | 104 | 104 | 86 ± 10 |
| | PrAs, % | 39.4 | 4.2 | 35.2 | 9.5 | 21.8 | 22.1 | |
| Лето | SeSR, $\Gamma C M^{-2}$ | 205 | 194 | 221 | 174 | 200 | 199 | 190 ± 24 |
| | PrAs, % | 8.1 | 2.2 | 16.1 | -8.5 | 5.2 | 4.5 | |
| Осень | <i>SeSR</i> , г С м ⁻² | 120 | 91 | 115 | 93 | 106 | 105 | 111 ± 14 |
| | PrAs, % | 8.1 | -17.6 | 3.4 | -16.0 | -4.8 | -5.5 | |

Таблица 5. Точность оценки (*PrAs*) разных версий *T&P-модел*и с использованием усредненных метеорологических параметров за 1998–2017 гг. для расчета сезонных и годовых потоков CO₂ (*SeSRmod-mean*, г С м⁻²) из дерново-подзолистой почвы Приокско-Террасного биосферного заповедника

* (1) — среднее значение для версий *T&P-1* и *T&P-2* (исходные версии *T&P-модели*), (2) — среднее значение для всех четырех версий *T&P-модели*; **CI — доверительный интервал среднегог (confidence interval).

Оценка сезонных и годовых потоков, полученных на основе значений SRm, определенных при помощи разных версий T&P-модели и усредненных метеорологических параметров

Еше один вариант расчетов месячной интенсивности дыхания почв (SRm-mean) с помощью четырех версий Т& Р-модели был выполнен с использованием усредненных за 20 лет (1998-2017 гг.) метеорологических данных, используемых в Т&Рмодели в качестве независимых переменных. Затем на их основе были рассчитаны величины сезонных и годовых потоков СО2 (как арифметическая сумма SRm-mean за соответствующие месяцы) и аналогично описанному выше алгоритму была оценена точность модельных расчетов по отношению к экспериментально полученным средним оценкам соответствующих сезонных потоков СО₂ из дерново-подзолистой почвы. Результаты получились весьма обнадеживающими (табл. 5). Точность оценок сезонных годовых потоков, полученных таким способом отражала все те закономерности, которые были подробно описаны выше, с той лишь разницей, что абсолютные величины PrAs для средних значений по двум исходным версиям и ансамблю из всех четырех версий Т&Р-модели получились при использовании среднемноголетних метеорологических данных немного выше. Использование осредненных за 20 лет метеорологических данных в большинстве случаев завышало экспериментально полученные сезонные и годовые потоки СО2 из почв. Так, осредненные значения SeSRmod-mean для годового, летнего и зимнего потоков СО₂ из почвы были в среднем на 4.5-6.7% выше, чем SeSRexp, а

значения SeSRmod-mean для теплого сезона показали переоценку, составляющую около 3% (табл. 5). Самое значительное несоответствие расчетных оценок экспериментальным данным было выявлено для весеннего периода: завышение составило ~22%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Непрерывный 20-летний мониторинг эмиссии СО₂ из дерново-подзолистой почвы в смешанном лесу Приокско-Террасного биосферного заповедника показал высокую временною вариабельность дыхания почвы на месячном, сезонном и годовом уровнях осреднения, которая обусловлена главным образом различным сочетанием тепло- и влагообеспеченности. Проведенные численные эксперименты показали, что все версии Т&Р-модели (исходные и параметризованные на основе обучающих выборок в различных временных интервалах) удовлетворительно описывают многолетнюю временную динамику среднемесячной интенсивности дыхания дерново-подзолистой почвы под лесной растительностью (SRm). Параметризация Т&Р-модели с использованием экспериментальных данных в качестве обучающих выборок практически не улучшила качество моделирования месячных потоков СО2 из почв ни в одном из тестовых интервалов. Использование осредненных за 20 лет метеорологических данных показало свою применимость для оценки сезонных и годовых потоков СО2 из почвы. Несмотря на то, что анализ точности расчетов с помощью Т&Р-модели опирался на очень детальные экспериментальные данные, получен-

ные только для одной экосистемы, мы могли бы рекомендовать описанные выше способы расчетов для получения экспертных оценок сезонных и годовых потоков СО₂ из почв в зоне умеренноконтинентального климата, где температура возлуха и количество выпалающих осалков определяют внутригодовую интенсивность почвенного дыхания. Учитывая, что сегодня доступными становятся все новые и новые базы климатических данных разного и часто довольно детального пространственного разрешения (например, World-Clim, www.worldclim.org), алгоритмы оценок почвенного дыхания с помощью нескольких версий *Т&Р-модели*, представленные в нашей работе, будут приобретать все большую актуальность для целей оценки эмиссионной составляющей углеродного цикла в различных регионах.

* * *

Авторы признательны сотрудникам Станции Фонового Мониторинга (п. Данки, Серпуховский район, Московская область), предоставивших ряды метеорологических данных для проведения модельных расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Честных О.В. Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Вопросы лесной науки. 2018. Т. 1. № 1. С. 1–24.

Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. № 6. С. 23–34.

Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л., Шилкин А.В., Марунич А.С., Карелин Д.В., Блинов В.Г., Иващенко А.И. Мониторинг газообмена H₂O и CO₂ на полигоне "Лог Таежный" (Валдайский национальный парк) // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Том 1. С. 54–68.

Иванов А.В., Браун М., Татауров В.А. Сезонная и суточная динамика эмиссии СО₂ из почв кедровых лесов южного Сихотэ-Алиня // Почвоведение. 2018. № 3. С. 297–303

Комаров А.С., Чертов О.Г., Надпорожская М.А., Пhunyтина И.В. Моделирование динамики органического вещества лесных почв / Отв. ред. В. Н. Кудеяров. М: Наука. 2007. 380 с.

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Аблеева В.А., Быховец С.С. Климат южного Подмосковья: современные тренды и оценка экстремальности // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 4. С. 62–78.

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ромашкин И.В., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В. Применение Т& Р-модели для численной оценки годовых потоков CO₂ из почв лесных экосистем // Научные основы устойчивого управления лесами: Материалы Всероссийской научной конференции. — М.: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 2018. С. 196–197. Лукина Н.В., Исаев А.С., Крышень А.М., Онучин А.А., Сирин А.А., Гагарин Ю.Н., Барталев С.А. Приоритетные направления развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами // Лесоведение. 2015. № 4. С. 243–254.

Осипов А.Ф. Эмиссия диоксида углерода с поверхности почвы сосняка чернично-сфагнового средней тайги // Почвоведение. 2013. № 5. С. 619–626.

Тейл Г. Экономические прогнозы и принятие решений. М.: Статистика, 1971. 488 с.

Чертов О.Г., Надпорожская М.А. Модели динамики органического вещества почв: проблемы и перспективы // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 2. С. 391–399.

Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.

Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: Изд-во Института экологии Волжского бассейна РАН, 2003. 463 с.

Bukvareva E.N., Grunewald K., Bobylev S.N., Zamolodchikov D.G., Zimenko A.V., Bastian O. The current state of knowledge of ecosystems and ecosystem services in Russia: A status report // AMBIO. 2015. V. 44(6), P. 491–507. https://doi.org/10.1007/s13280-015-0674-4

Chen S., Huang Y., Zou J., Shen Q., Hu Z., Qin Y., Chen H., Pan G. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties // Agricultural and Forest Meteorology. 2010. V. 150. № 4. P. 590–605.

Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Boreal forest health and global change // Science. 2015. V. 349. № 6250. P. 819–822.

Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina K., Reichstein M. Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database // Biogeosciences. 2015. V. 12. P. 4121–4132.

Isaev A.S., Soukhovolsky V.G., Khlebopros R.G. Model approaches to description of critical phenomena in forest ecosystems // Contemporary Problems of Ecology. 2011. V. 4. N° 7. P. 699–705.

Janssens I.A., Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest // Global Change Biology. 2003. V. 9. No 6. P. 911–918.

Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Isaev A.S. Unconsidered sporadic sources of carbon dioxide emission from soils in taiga forests // Doklady Biological Sciences. 2017. V. 475. N° 1. P. 165–168.

Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Gitarskii M.L. Factors of Spatiotemporal Variability of CO₂ Fluxes from Soils of Southern Taiga Spruce Forests of Valdai // Contemporary Problems of Ecology. 2014. V. 7. № 7. P. 743–751.

Kätterer T., Reichstein M., Andrén O., Lomander A. Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models // Biology and Fertility of Soils. 1998. V. 27. P. 258–262.

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Gallardo Lancho J.F., Oehm C.T. Evaluation of the Rates of Soil Organic Matter Mineralization in Forest Ecosystems of Temperate Continental, Mediterranean, and Tropical Monsoon Climates // Eurasian Soil Science. 2012. V. 45 (1). P. 68–79.

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Kudeyarov V.N. CO₂ Emission from Soils of Various Ecosystems of the Southern Taiga Zone: Data Analysis of Continuous 12-Year Monitoring // Doklady Biological Sciences. 2011a. V. 436. № 1. P. 56–58.

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Savin I.Y., Shorohova E.V. Carbon balance in forest ecosystems of southern part of Moscow region under a rising aridity of climate // Contemporary Problems of Ecology. 2017. V. 10. № 7. P. 748–760.

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Petrov A.S., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Ableeva V.A., Kudeyarov V.N. Effect of the Observed Climate Changes and Extreme Weather Phenomena on the Emission Component of the Carbon Cycle in Different Ecosystems of the Southern Taiga Zone // Doklady Biological Sciences. 2011b. V. 441. Nº 1. P. 412–416. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Rozanova L.N., Sapronov D.V., Myakshina T.N., Kudeyarov V.N. Annual and seasonal CO₂ fluxes from Russian southern taiga soils // Tellus B: chemical and physical meteorology. 2003. V. 55. Nº 2. P. 338–344.

Lal R. Forest soils and carbon sequestration // Forest Ecology & Management. 2005. V. 220. P. 242–258.

Le Quéré C., Peters G.P., Andres R.J., Andrew R.M., Boden T.A., Ciais P., Friedlingstein P., Houghton R.A., Marland G., Moriarty R., Sitch S., Tans P., Arneth A., Arvanitis A., Bakker D.C.E., Bopp L., Canadell J.G., Chini L.P., Doney S.C., Harper A., Harris I., House J.I., Jain A.K., Jones S.D., Kato E., Keeling R.F., Klein Goldewijk K., Körtzinger A., Koven C., Lefèvre N., Maignan F., Omar A., Ono T., Park G.-H., Pfeil B., Poulter B., Raupach M.R., Regnier P., Rödenbeck C., Saito S., Schwinger J., Segschneider J., Stocker B.D., Takahashi T., Tilbrook B., Van Heuven S., Viovy N., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zaehle S. Global carbon budget 2014 // Earth System Science Data Discussion 2014. V. 6. \mathbb{N} 1. P. 235–263. Liu Y., Shang Q., Wang Z., Zhang K., Zhao C. Spatial Heterogeneity of Soil Respiration Response to Precipitation Pulse in a Temperate Mixed Forest in Central China // J. Plant and Animal Ecology. 2017. V. 1(1). P. 1–13.

Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudeyarov V.N. Annual emission of carbon dioxide from soils of the Southern Taiga of Russia // Eurasian Soil Science. 2001. V. 34. № 9. P. 931–944.

Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudeyarov V.N. Effect of temperature and moisture content on CO₂ evolution rate of cultivated Phaeozem: analyses of long-term field experiment // Plant, Soil and Environment. 2005. V. 51 (5). P. 213–219.

R Core Team. (2018). (Version R-3.5.1). Retrieved from https://cran.r-project.org/bin/windows/base/

Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils // *Global Biogeochem. Cycles.* 1995. V. 9. N_{P} 1. P. 23-36.

Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94 // Global Change Biology. 2002. V. 8. № 8. P. 800–812.

Reichstein M., Rey A., Freibauer A., Tenhunen J., Valentini R., Banza J., Casals P., Grünzweig J.M., Irvine J., Joffre R., Law B.E., Loustau D., Miglietta M., Oechel W., Ourcival J.-M., Pereira J.S., Peressotti A., Ponti F., Qi Y., Rambal S., Rayment M., Romanya J., Rossi F., Tedeschi V., Tirone G., Xu M., Yakir D. Modeling temporal and large spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices // Global Biogeochemical Cycles. 2003. V. 17. Nº 4. 1104

Song X., Peng C., Zhao Z., Zhang Z., Guo B., Wang W., Jiang H., Zhu Q. Quantification of soil respiration in forest ecosystems across China // Atmospheric Environment. 2014. V. 94. P. 546–551.

Vygodskaya N.N., *Varlagin* A.V., *Kurbatova* Yu.A., *Olchev* A.V., *Panferov* O.I., *Tatarinov* F.A., *Shalukhina* N.V. Response of taiga ecosystems to extreme weather conditions and climate anomalies // Doklady Biological Sciences. 2009. V. 429. \mathbb{N} 6. P. 571–574.

Wang X., Jiang Y., Jia B., Wang F., Zhou G. Comparison of soil respiration among three temperate forests in Changbai Mountains, China // Canadian J. Forest Research. 2010. V. 40 (4). P. 788–795

www.worldclim.org

Zamolodchikov D.G., Grabovsky V.I., Shulyak P.P., Chestnykh O.V. Recent Decrease in Carbon Sink to Russian Forests // Doklady Biological Sciences. 2017. V. 476. P. 200– 202.

Zheng Z.M., Yu G.R., Fu Y.L., Wang Y.S., Sun X.M., Wang Y.H. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study // Soil Biology and Biochemistry. 2009. V. 5. Issue 7. P. 1–10.

Natural and Model Assessments of Respiration of Forest Sod-Podzolic Soil in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve

I. N. Kurganova^{1, *}, V. O. Lopes de Gerenyu¹, T. N. Myakshina¹, D. V. Sapronov¹, I. V. Romashkin², V. A. Zhmurin¹, and V. N. Kudeyarov¹

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Sciences, Russian Academy of Sciences,

Institutskaya st. 2, Pushchino, Moscow Oblast, 142290 Russia

²Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,

Pushkinskaya st. 11, Petrozavodsk, 185910 Russia

**E-mail: ikurg@mail.ru* Received 10 February 2019 Edited 15 April 2019 Accepted 5 June 2019

Modeling of carbon cycle in forests is conventionally reduced to modeling of the main components, including emissions (respiration of soils and debris) and production (deposition of carbon in plants and soils). In this study we examined applicability of various versions of T&P-model to estimate of monthly, seasonal and annual fluxes of CO_2 from sod-podzolic soil in mixed forest of Prioksko-Terrasny Nature Reserve, Moscow

Oblast. The model was parameterized, verified and the accuracy was tested using the database of 20-year monitoring of CO_2 emissions from soils and independent weather variables, including mean monthly air temperature, and monthly precipitation. The numeric experiments showed that all versions of the T&P model (both initial and parameterized by a training sets at different temporal intervals) satisfactorily describe the interannual dynamics of mean monthly respiration of sod-podzolic soil under forest cover, *SRm*. Parameterization of T&P model with experimental data as a training set did not improved the quality of modeling in

any of the test intervals. When 20 years means weather data were used for estimation of *SRmod-mean*, seasonal and annual soil fluxes of CO₂ (*SeSRmod-mean*), the experimental values of *SeSRexp* were less in most cases. *SeSRmod-mean* for annual, summertime and wintertime soil CO₂ fluxes were on average 4.5–6.7% higher than *SeSRexp*, and 3% for the warm period. The largest discrepancy was found during spring, with ~22% excess of modeled over measured data. Thus, the 20 years mean weather data approved applicability of an ensemble of versions of T&P-model for estimation of seasonal and annual fluxes of CO₂ from soil in humid continental climate.

Keywords: soil CO_2 emission, empiric modeling, weather parameters, forest ecosystems, humid continental climate, parameterization, verification, accuracy of modeling.

Acknowledgements: Studies were held in the framework of the State Assignment (project no. AAAA-A18-118013190177-9) with the financial support of the Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (project no. 0191-2019-0045) and Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-04-01282a).

REFERENCES

Bukvareva E.N., Grunewald K., Bobylev S.N., Zamolodchikov D.G., Zimenko A.V., Bastian O., The current state of knowledge of ecosystems and ecosystem services in Russia: A status report, *Ambio*, 2015, Vol. 44, No. 6, pp. 491–507.

Chen S., Huang Y., Zou J., Shen Q., Hu Z., Qin Y., Chen H., Pan G., Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, Vol. 150, No. 4, pp. 590–605.

Chertov O.G., Nadporozhskaya M.A., Modeli dinamiki organicheskogo veshchestva pochv: problemy i perspektivy (Models of soil organic matter dynamics: problems and perspectives), *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*, 2016, Vol. 8, No. 2, pp. 391–399.

Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Boreal forest health and global change, *Science*, 2015, Vol. 349, No. 6250, pp. 819–822.

Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina K., Reichstein M., Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database, *Biogeosciences*, 2015, Vol. 12, pp. 4121–4132.

http://www.R-project.org/, (16 May 2019).

Isaev A.S., Soukhovolsky V.G., Khlebopros R.G., Model approaches to description of critical phenomena in forest ecosystems, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 699–705.

Ivanov A.V., Braun M., Tataurov V.A., Seasonal and daily dynamics of the CO_2 emission from soils of *Pinus koraiensis* forests in the south of the Sikhote-Alin Range, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 3, pp. 290–295.

Janssens I.A., Pilegaard K., Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest, *Global Change Biology*, 2003, Vol. 9, No. 6, pp. 911–918.

Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Gitarskii M.L., Factors of spatiotemporal variability of CO₂ fluxes from soils of southern taiga spruce forests of Valdai, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 743–751.

Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Isaev A.S., Unconsidered sporadic sources of carbon dioxide emission from soils in taiga forests, *Doklady Biological Sciences*, 2017, Vol. 475, No. 1, pp. 165–168.

Kätterer T., Reichstein M., Andrén O., Lomander A., Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models, *Biology and fertility of soils*, 1998, Vol. 27, No. 3, pp. 258–262.

Kudeyarov V.N., *Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva lesnykh pochv* (Modeling of dynamics of organic matter in forest soils), Moscow: Nauka, 2007, 380 p.

Kurganova I., Lopes De Gerenyu V., Rozanova L., Sapronov D., Myakshina T., Kudeyarov V., Annual and seasonal CO₂ fluxes from Russian southern taiga soils, *Tellus B: chemical and physical meteorology*, 2003, Vol. 55, No. 2, pp. 338–344.

Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Ableeva V.A., Bykhovets S.S., Klimat yuzhnogo Podmoskov'ya: sovremennye trendy i otsenka anomal'nosti (Climate of Moscow Region south: Current trends and assessment of extremeness), *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2017, Vol. 4, pp. 62–78.

Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Gallardo Lancho J.F., Oehm C.T., Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, mediterranean, and tropical monsoon climates, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol. 45, No. 1, pp. 68–79.

Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Kudeyarov V.N., CO₂ emission from soils of various ecosystems of the Southern Taiga Zone: Data analysis of continuous 12-year monitoring, *Doklady Biological Sciences*, 2011, Vol. 436, No. 1, pp. 56–58.

Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Savin I.Y., Shorohova E.V., Carbon balance in forest ecosystems of southern part of Moscow region under a rising aridity of climate, *Contemporary problems of ecology*, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 748–760.

Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Petrov A.S., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Ableeva V.A., Kudeyarov V.N., Effect of the observed climate changes and extreme weather phenomena on the emission component of the carbon cycle in different ecosystems of the southern taiga zone, *Doklady Biological Sciences*, 2011, Vol. 441, No. 1, pp. 412–416.

ЛЕСОВЕДЕНИЕ № 5 2019

Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Romashkin I.V., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Primenenie T&P modeli dlya chislennoi otsenki godovykh potokov CO₂ iz pochv lesnykh ekosistem (Long-term population dynamics of the *Aporrectodea caliginosa* earthworm in broadleaved forests of Kaluga Oblast), *Nauchnye osnovy ustoichivogo upravleniya lesami* (Theoretical basis of sustainable management of forests), Moscow, 25–27 October 2016, Moscow: Izd-vo TsE-PL RAN, 2018, pp. 197–199.

Lal R., Forest soils and carbon sequestration, *Forest Ecology* and *Management*, 2005, Vol. 220, No. 1–3, pp. 242–258.

Le Quéré C., Peters G.P., Andres R.J., Andrew R.M., Boden T.A., Ciais P., Friedlingstein P., Houghton R.A., Marland G., Moriarty R., Sitch S., Tans P., Arneth A., Arvanitis A., Bakker D.C.E., Bopp L., Canadell J.G., Chini L.P., Doney S.C., Harper A., Harris I., House J.I., Jain A.K., Jones S.D., Kato E., Keeling R.F., Klein Goldewijk K., Körtzinger A., Koven C., Lefèvre N., Maignan F., Omar A., Ono T., Park G.-H., Pfeil B., Poulter B., Raupach M.R., Regnier P., Rödenbeck C., Saito S., Schwinger J., Segschneider J., Stocker B.D., Takahashi T., Tilbrook B., Van Heuven S., Viovy N., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zaehle S., Global carbon budget 2013, *Earth system science data*, 2014, Vol. 6, No. 1, pp. 235–263.

Liu Y., Shang Q., Wang Z., Zhang K., Zhao C., Spatial Heterogeneity of Soil Respiration Response To Precipitation Pulse in A Temperate Mixed Forest in Central China, *Journal of Plant and Animal Ecology*, 2017, Vol. 1, No. 1, pp. 1. Lopes De Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudeyarov V.N., Annual emission of carbon dioxide from soils of the southern taiga zone of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2001, Vol. 34, No. 9, pp. 931–944.

Lopes De Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudeyarov V.N., Effect of temperature and moisture on CO_2 evolution rate of cultivated Phaeozem: analyses of long-term field experiment, *Plant, soil and environment*, 2005, Vol. 51, No. 5, pp. 213–219.

Lukina N.V., Isaev A.S., Kryshen' A.M., Onuchin A.A., Sirin A.A., Gagarin Y.N., Bartalev S.A., Prioritetnye napravleniya razvitiya lesnoi nauki kak osnovy ustoichivogo upravleniya lesami (Research priorities in forest science - the basis of sustainable forest management), *Lesovedenie*, 2015, No. 4, pp. 243–254.

Osipov A.F., Emissiya dioksida ugleroda s poverkhnosti pochvy spelogo sosnyaka chernichnogo v srednei taige Respubliki Komi (Carbon dioxide emission from the soil surface in mature bilberry pine forest in Middle Taiga of the Komi Republic), *Lesovedenie*, 2015, No. 5, pp. 356–366.

Raich J.W., Potter C.S., Global patterns of carbon dioxide emissions from soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, Vol. 9, No. 1, pp. 23–36.

Raich J.W., Potter C.S., Bhagawati D., Interannual variability in global soil respiration, 1980-94, *Global Change Biology*, 2002, Vol. 8, No. 8, pp. 800–812.

Reichstein M., Rey A., Freibauer A., Tenhunen J., Valentini R., Banza J., Casals P., Grünzweig J.M., Irvine J., Joffre R., Law B.E., Loustau D., Miglietta M., Oechel W., Ourcival J.-M., Pereira J.S., Peressotti A., Ponti F., Qi Y., Rambal S., Rayment M., Romanya J., Rossi F., Tedeschi V., Tirone G., Xu M., Yakir D., Modeling temporal and largescale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices, *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, Vol. 17, No. 4, pp. 1104.

Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D., Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii (Quantitative hydroecology: methods of system identification), Tolyatti: Izd-vo SamNTs RAN, 2003, 463 p.

Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Uglerodnyi byudzhet lesov Rossii (Carbon budget of Russian forests), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 69–92.

Song X., Peng C., Zhao Z., Zhang Z., Guo B., Wang W., Jiang H., Zhu Q., Quantification of soil respiration in forest ecosystems across China, *Atmospheric Environment*, 2014, Vol. 94, pp. 546–551.

Theil H., *Economic forecasts and policy*, Moscow: Statistika, 1971, 487 p.

Vygodskaya N.N., Varlagin A.V., Kurbatova Y.A., Ol'chev A.V., Panferov O.I., Tatarinov F.A., Shalukhina N.V., Response of taiga ecosystems to extreme weather conditions and climate anomalies, *Doklady Biological Sciences*, 2009, Vol. 429, No. 6, pp. 571–574.

Wang X., Jiang Y., Jia B., Wang F., Zhou G., Comparison of soil respiration among three temperate forests in Changbai Mountains, China, *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, Vol. 40, No. 4, pp. 788–795.

Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Chestnykh O.V., Dinamika balansa ugleroda v lesakh federal'nykh okrugov Rossiiskoi Federatsii (Dynamics of the carbon budget of forests of federal districts of Russian Federation), *Voprosy lesnoi nauki*, 2018, Vol. 1, No. 1, doi 10.31509/2658-607X-2018-1-1-24.

Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N., A twenty year retrospective on the forest carbon dynamics, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 706–715.

Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Shulyak P.P., Chestnykh O.V., Recent decrease in carbon sink to Russian forests, *Doklady Biological Sciences*, 2017, Vol. 476, No. 1, pp. 200–202.

Zamolodchikov D.G., Gytarsky M.L., Shilkin A.V., Marunich A.S., Karelin D.V., Blinov V.G., Ivashchenko A.I., Monitoring tsiklov dioksida ugleroda i vodyanogo para na poligone "Log Taezhnyi" (Valdaiskii natsional'nyi park) (Monitoring of carbon dioxide and water vapor cycles at the "Log Tayozhny" experimental site (National park "Valdaysky")), *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2017, Vol. 1, pp. 54–68.

Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Gitarskii M.L., Byudzhet ugleroda upravlyaemykh lesov Rossiiskoi Federatsii (Carbon budget of the managed forests of the Russian Federation), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 23–34.

Zheng Z.-M., Yu G.-R., Fu Y.-L., Wang Y.-S., Sun X.-M., Wang Y.-H., Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study, *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, Vol. 41, No. 7, pp. 1531–1540.