

ОЦЕНКА ДЫХАНИЯ ПОЧВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ РАЙХА–ХАШИМОТО: ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И ПРОГНОЗ

© 2022 г. О. Э. Суховеева^a, *, Д. В. Карелин^a

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Поступила в редакцию 09.12.2021 г.

После доработки 11.02.2022 г.

Принята к публикации 12.02.2022 г.

Дыхание, или эмиссия CO_2 из почвы, является наиболее мощным исходящим потоком углерода в наземных экосистемах, что выводит его точную оценку и прогноз в разряд важнейших биосферных задач. Среди множества регрессионных моделей, оценивающих дыхание почвы, нами была выбрана относительно простая и широко распространенная модель Т&Р (Райха–Хашимото). Модель была применена для описания имеющихся многолетних рядов наблюдений за эмиссией CO_2 в экосистемах южной тайги и лесостепи Европейской территории России. Объектами исследования выступали местные биотопы: луговая степь, молодая залежь и ясеневый лес на типичных черноземах в Курской области; еловый лес и участки распада елового древостоя на дерново-подзолах, а также верховое болото на торфяных болотных почвах — в Новгородской области. По результатам параметризации уровни дыхания почвы при 0°C были увеличены в 1.06–1.54 раза по сравнению с исходными значениями модели, степенные коэффициенты температурной функции — в 1.04–1.41 раза, тогда как коэффициенты зависимости от осадков были изменены для обеих природных подзон в 0.87–0.99 раза. Скорректированные версии модели показали хорошую сходимость с результатами полевых измерений. Согласно прогнозу, при сохранении современного темпа роста температуры воздуха и текущего количества осадков эмиссия CO_2 из дерново-подзолов Новгородской области усилится на 1.4–2.2% за 10 лет, тогда как дыхание типичных черноземов в Курской области увеличится на 0.3–3.8%. Модель демонстрирует хорошую пластичность применительно к зональным типам почв и конкретным экосистемам и наилучшим образом подходит для описания среднегодовых величин почвенной эмиссии CO_2 как при ее многолетнем прогнозе, так и при ретроспективном анализе.

Ключевые слова: дерново-подзолы, изменение климата, обратная задача моделирования, типичные черноземы, эмиссия CO_2 из почвы

DOI: 10.31857/S2587556622030153

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Дыхание почвы (эмиссия CO_2 из почвы) — главная составляющая потока углерода из наземных экосистем в атмосферу, вклад которой в ходе современного потепления возрастает (Bond-Lamberty and Thomson, 2010), что выводит его точную оценку и прогноз в разряд важнейших биосферных задач. Для этого необходима простая модель, использующая климатические показатели, применимая для значительных площадей суши и длительных промежутков времени.

При математическом описании природных процессов особенно важна параметризация уравнений, направленная на уточнение их коэффициентов в соответствии с особенностями отдельных экосистем. Подобные ситуации называются обратными задачами моделирования, когда параметры модели корректируются путем сопоставления результатов расчетов с наблюдаемыми дан-

ными. Другими словами, это поиск неизвестных величин коэффициентов по известным следствиям, в результате чего уточняются константы в правой части уравнений (Цей, Шумафов, 2008). Это представляется особенно важным при описании биогеохимических циклов, поскольку дает полезную информацию о чувствительности переменных и согласованности региональных моделей со сценариями глобальных климатических изменений и выбросов парниковых газов в пространстве и времени (Ruane and McDermid, 2017).

Такая параметризация рассмотрена нами на примере регрессионной модели Т&Р (temperature and precipitations), оценивающей дыхание почвы, обусловленное климатом. Исходная версия Т&Р была разработана Райхом в конце XX в. (Raich and Potter, 1995). Несмотря на то, что это одна из самых простых моделей, описывающих компоненты цикла углерода в наземных экосистемах, она

позволяет определить влияние внутригодовых колебаний гидротермических параметров на глобальные потоки CO_2 из почвы в атмосферу с точным интервалом. Для зоны умеренного климата результаты соответствуют сезонному ходу температуры с одним максимумом, а пространственное распределение почвенного дыхания соответствует распространению осадков (Raich et al., 2002).

Среди несомненных преимуществ модели следует указать легкость расчетов, а также доступность необходимых входных данных, поскольку она содержит всего две переменных – среднемесячную температуру воздуха и количество осадков. Действительно, многими исследователями подтверждается, что динамика потоков углерода в почве в достаточной степени может быть объяснена этими двумя факторами, а также географическим положением участка (Chen et al., 2020).

С другой стороны, модель Райха не учитывает влияние растительности, зональных особенностей почвенного покрова, водного режима и других характеристик биоценозов. Также важно отметить, что она не разделяет эмиссию CO_2 из почвы на микробное и корневое дыхание, хотя вклад их в суммарный поток будет отличаться в зависимости от сезона и типа экосистемы (Hanson et al., 2000). В связи с этим многими авторами предлагалось включить в нее дополнительные параметры, например, индекс площади листовой поверхности (Reichstein et al., 2003) или содержание почвенного органического углерода (Chen et al., 2010). Также отмечено, что модель не учитывает накопление влаги в почве за счет осадков в предыдущие месяцы, и это, вероятно, является основной причиной возникающих погрешностей (Reichstein et al., 2003). На основе этого Хашимото с соавт. было проведено усовершенствование модели, заключающееся во внедрении в нее дополнительных поправочных коэффициентов для температуры и осадков (Hashimoto et al., 2015). Именно эта версия модели была выбрана нами для параметризации.

Цель работы состояла в настройке параметров модели Райха–Хашимото для существенно различающихся по структуре растительности, типам почвы и климату природных зон и местных экосистем, а также прогнозе отклика дыхания почвы в них на потепление климата.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходное уравнение модели содержало три константы:

$$R_s = Fe^{QT} \frac{P}{K + P} \quad (\text{Raich and Potter, 1995}). \quad (1)$$

В ходе дальнейшего усовершенствования (Hashimoto et al., 2015) оно приобрело вид:

$$R_s = Fe^{(aT - bT^2)} \frac{\alpha P + (1 - \alpha) P_{m-1}}{K + \alpha P + (1 - \alpha) P_{m-1}}, \quad (2)$$

где R_s – дыхание почвы, $\text{г С м}^{-2} \text{сут}^{-1}$, F – дыхание почвы при 0°C в отсутствие ограничения по увлажнению, $\text{г С м}^{-2} \text{сут}^{-1}$, Q – коэффициент экспоненциальной зависимости дыхания почвы от температуры, $^\circ\text{C}^{-1}$, a ($^\circ\text{C}^{-1}$) и b ($^\circ\text{C}^{-2}$) – параметры температурной функции, K – константа полунасыщения гиперболической зависимости дыхания почвы от количества осадков за месяц, см, α – параметр функции осадков, T – среднемесячная температура воздуха, $^\circ\text{C}$, P – сумма осадков за месяц, см, P_{m-1} – сумма осадков за предыдущий месяц, см.

Оптимизацию констант модели, а именно F , a , b , K , α осуществляли через пакет анализа “Поиск решения” в MS Excel.

Объектами исследования служили два экспериментальных участка, расположенные на Европейской территории России (табл. 1): Курская биосферная станция Института географии РАН и Полигон “лог Таежный” Валдайского филиала Государственного гидрологического института Росгидромета РФ, где заложены площадки длительного мониторинга эмиссии CO_2 из почвы. Измерения проводились полевыми газоанализаторами круглогодично, с околосреднемесячными интервалами, методом закрытых камер на постоянных точках в 10-кратной повторяемости. Подробно методика измерений была неоднократно описана в наших более ранних публикациях (Алферов и др., 2017; Карелин и др., 2019; Karelin et al., 2021).

Для оценки адекватности внесенных в модель изменений применяли коэффициент эффективности Нэша–Сатклиффа (параметризация проведена корректно, если $NS > 0$, особенно успешными считаются случаи, когда $NS > 0.5$), коэффициент несоответствия Тейла (расчетные значения идентичны измеренным, если $T < 0.30$) и коэффициент корреляции Пирсона (r_p).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты параметризации представлены в табл. 2. Для всех локальных экосистем значения коэффициента F , соответствующего дыханию почвы при 0°C , увеличились: для лесостепной подзоны в 1.13–1.54 раза, для южной тайги в 1.07–1.17. Это закономерно, поскольку абсолютные значения эмиссии CO_2 из черноземов выше, чем из дерново-подзолов.

Вместо стандартной температурной зависимости, выраженной через Q_{10} , в версии Хашимото (уравнение 2) в степени экспоненты стоит уравнение параболы, включающее два коэффициен-

Таблица 1. Объекты исследования

Объект	Курская биосферная станция Института географии РАН	Полигон “лог Тажный” Валдайского филиала Государственного гидрологического института
Местонахождение	Курская обл., Медвенский р-н	Новгородская обл., Валдайский р-н
Биотопы	Степь (участок некосимой луговой степи возрастом более 70 лет, 10 точек); молодая залежь (с 2017 г., 10 точек); ясеневый лес (10 точек)	Еловый лес (31 точка); участки распада древостоя в результате ветровалов (16 точек); верховое болото (3 точки)
Природная подзона	Лесостепь	Южная тайга
Тип почвы	<i>Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)</i> , (типичный чернозем)	Еловый лес: <i>Stagnic Albic Podzol (Arenic, Ruptic)</i> (дерново-подзол контактно-осветленный); верховое болото: <i>Dystic Fibric Histosol</i> (торфяная олиготрофная почва)
Период наблюдений за эмиссией CO ₂	2017–2021 гг.	2014–2021 гг.
Продолжительность ряда наблюдений	32 среднемесячных значения	42 среднемесячных значения
Среднегодовая температура воздуха, °C*	7.2 ± 0.9 (1990–2020 гг.)	5.0 ± 0.8 (1990–2020 гг.)
Среднегодовое количество осадков, мм*	634 ± 103 (1990–2020 гг.)	839 ± 141 (2009–2020 гг.)
Метеоданные	Метеостанция Davis Instruments Vantage Pro 2 с калькулятором web-iu-meteo-tools (http://igras-tools.ru/)	Метеостанция Росгидромета РФ №580330 (г. Валдай)

Примечание. * Для температур воздуха и сумм осадков приведены средние и их стандартные ошибки за периоды, по которым рассчитывались тренды.

Таблица 2. Результаты параметризации модели

Коэффициент	Исходное значение	Скорректированные значения					
		Курская биосферная станция			Полигон “лог Тажный”		
		степь	молодая залежь	ясеневый лес	еловый лес	участки распада древостоя	болото
<i>F</i>	1.76	2.16	2.71	1.99	1.89	2.06	1.67
<i>a</i>	0.049	0.057	0.069	0.053	0.051	0.054	0.048
<i>b</i>	0.00060	0.00058	0.00056	0.00059	0.00060	0.00059	0.00060
<i>K</i>	1.46	1.39	1.27	1.42	1.44	1.42	1.46
α	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47

та. Старшие коэффициенты по сравнению с базовой версией были значительно уменьшены для Курской области ($b = 0.053–0.069$) и остались практически неизменными для Новгородской ($b = 0.048–0.054$). Второй коэффициент параболы a был увеличен как для лесостепи (в 1.08–1.41 раз), так и для южной тайги (в 1.04–1.10 раз).

Блок влияния увлажнения на дыхание почвы в модификации Хашимото также содержит две

константы, и если значения коэффициента зависимости от количества осадков K были несколько уменьшены по отношению к исходному: в 0.87–0.97 раз для лесостепи и 0.97–0.99 раз для южной тайги, то параметр α остался без изменения для всех шести местных экосистем.

Обособленно выглядят лишь результаты моделирования эмиссии CO₂ из верхового болота в южнотаежной подзоне: коэффициент дыхания

Таблица 3. Статистическая проверка результатов параметризации модели

Показатель	Курская биосферная станция			Полигон “лог Тажный”		
	степь	молодая залежь	ясеневый лес	еловый лес	участки распада древостоя	болото
Измеренные <i>in situ</i> среднегодовые значения почвенной эмиссии, г С м ⁻² сут ⁻¹	3.330 ± 1.986	5.084 ± 3.067	2.930 ± 2.202	2.676 ± 1.724	3.027 ± 1.983	2.296 ± 1.847
Смоделированные среднегодовые значения почвенной эмиссии до параметризации, г С м ⁻² сут ⁻¹		1.424 ± 0.275			2.372 ± 0.575	
Смоделированные среднегодовые значения почвенной эмиссии после параметризации, г С м ⁻² сут ⁻¹	3.238 ± 1.138	5.083 ± 2.102	2.828 ± 0.946	2.620 ± 0.658	2.980 ± 0.785	2.249 ± 0.532
Коэффициент Нэша–Саттклифа, NS	0.639	0.704	0.234	0.364	0.364	0.124
Коэффициент Тейла, T	0.160	0.144	0.285	0.231	0.234	0.326
Коэффициент корреляции, <i>r_p</i> (<i>p</i> < 0.05)	0.856	0.856	0.490	0.669	0.659	0.361

почвы при 0°С был в этом случае уменьшен, тогда как все остальные показатели остались без изменения. Наиболее очевидным объяснением является обводненность слоя торфа, что приводит к подавлению как продукции, так и транспорта CO₂.

Исходная версия модели существенно занижает средние величины дыхания почвы для всех исследуемых экосистем, поэтому необходимость коррекции модели по полевым значениям самоочевидна. Согласно статистическим критериям, параметризация была успешно выполнена для всех экосистем (табл. 3). Величины коэффициентов свидетельствуют о хорошей сходимости изме-

ренных и смоделированных величин. Также это наглядно представлено на рис. 1 и 2.

Скорректированная модель может выполнять не только описательную, но и прогностическую функцию, в частности предсказывать отклик дыхания почвы на повышение температуры. Согласно нашим расчетам на основе данных архива ВНИИГМИ-МЦД по метеостанции г. Курск (№ 34009), за последние 30 лет (1991–2020 гг.) среднегодовая температура воздуха в этом районе составила 7.1 ± 0.9°С, при этом наблюдается выраженное потепление, которое происходит со скоростью 0.71°С/10 лет, т.е. каждое десятилетие температура повышается на 10.0%.



Рис. 1. Результаты применения параметризованной модели к описанию дыхания почвы (г С м⁻² сут⁻¹) в биотопах лесостепи в Курской области: (а) — для луговой степи, (б) — для молодой залежи, (в) — для ясеневых леса.



Рис. 2. Результаты применения параметризованной модели к описанию дыхания почвы ($\text{г С м}^{-2} \text{сут}^{-1}$) в биотопах южной тайги в Новгородской области: (а) — для елового леса, (б) — для участков распада древостоя, (в) — для верхового болота.

Доступный ряд данных по метеостанции г. Валдай (№ 580330) состоит из двух периодов: 1990–2000 и 2009–2020 гг., что, тем не менее, позволяет оценить характер изменения температуры воздуха в этом районе Новгородской области: при среднегодовой температуре $5.0 \pm 0.8^\circ\text{C}$ положительный тренд за эти периоды составил $0.64^\circ\text{C}/10$ лет, т.е. 12.7%.

Полученные данные позволяют сделать прогноз, согласно которому при сохранении текущего количества осадков и темпов потепления в Курской области дыхание типичных черноземов за 10 лет увеличится на 3.8% под залежами, на 1.0% под степной растительностью и на 0.3% в ясеневом лесу. Аналогично, в Новгородской области рост температуры воздуха на фоне достаточного увлажнения приведет к усилению эмиссии CO_2 из дерново-подзолов в точках распада древостоя на 2.2%, под ельниками на 1.9%, из верховых болот на 1.4% за 10 лет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравним результаты решения обратной задачи моделирования, полученные в нашей работе, с параметризацией той же модели, проведенной другими исследователями.

В нашем исследовании значения дыхания почвы при 0°C оказались увеличены относительно исходной величины ($F = 1.76 \text{ г С м}^{-2} \text{сут}^{-1}$) и находились в интервалах $1.99\text{--}2.71 \text{ г С м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ для исследованных экосистем в Курской области и $1.67\text{--}1.89 \text{ г С м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ для экосистем в Новгородской области. Сходные значения этот коэффициент принимал для луговых экосистем на серых лесных почвах: $1.687\text{--}1.843 \text{ г С м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ (Golubyatnikov et al., 2020). Для смешанного леса на дерново-подзолистых почвах эти коэффициенты,

напротив, были значительно уменьшены и составляли $0.961\text{--}1.162 \text{ г С м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ (Курганова и др., 2019). При этом уменьшение расчетной величины константы было связано, по мнению авторов, с усилением засушливости климата в регионе исследования, что признается основной причиной наблюдаемого снижения потоков CO_2 из почвы.

Поскольку константа полунасыщения K стоит в знаменателе (уравнения 1, 2), очевидно, что интенсивность эмиссии CO_2 из почвы обратно пропорциональна ее величине, что и наблюдается в действительности. Так, в Курской области, расположенной в зоне неустойчивого увлажнения (Смолянинов, Стародубцев, 2011), параметризованная константа зависимости дыхания почвы от количества осадков оказалась ниже ($K = 1.27\text{--}1.42 \text{ см}$), чем в Новгородской области ($K = 1.42\text{--}1.46 \text{ см}$), где увлажнение избыточное (Андреева и др., 2009). Для смешанного леса в Московской области эти коэффициенты были близки к южнотаежным из нашей работы и составляли $1.496\text{--}1.501 \text{ см}$ (Курганова и др., 2019), тогда как для луговых экосистем на серых лесных почвах они были значительно выше: $2.203\text{--}2.745 \text{ см}$ (Golubyatnikov et al., 2020).

Оба коэффициента в уравнении температурной функции были увеличены (важно обратить внимание, что коэффициент b стоит в формуле со знаком “минус”, поэтому его уменьшение по модулю означает фактическое увеличение показателя степени), причем для экосистем лесостепи в большей степени, чем для южной тайги. Однако не следует полагать, что подобная тенденция вступает в противоречие с известной широтно-географической закономерностью, согласно которой значение Q_{10} имеет тенденцию к росту с увеличением широты, что означает усиление тем-

пературной чувствительности дыхания почвы к северу (Zhou et al., 2009). Это связано с тем, что в модели Хашимото показатель степени представляет собой обратную параболу, отражающую пик дыхания почвы при оптимуме температуры окружающей среды.

Нельзя забывать, что показатели температуры и влажности почвы, особенности землепользования, а также их влияние на эмиссию CO_2 неразрывно связаны между собой. Так, в общем случае величина Q_{10} возрастает в ряду пашни < луга < леса, но с ростом влажности этот показатель увеличивается на пахотных землях, и уменьшается в лесах (Meyer et al., 2018).

В нашем исследовании, после параметризации, модель лишь на 2–3% занижает среднегодовые значения дыхания почвы, оцениваемые *in situ* во всех шести экосистемах. Это подтверждает возможность использования параметризованных версий модели, прежде всего, для оценки среднегодовой почвенной эмиссии CO_2 в местных экосистемах. Противоположная ситуация, а именно небольшое завышение оценок эмиссии CO_2 на 4.5–6.7%, наблюдалась при настройке модели для дерново-подзолистых почв под смешанными лесами в Московской области (Курганова и др., 2019).

По нашим данным, в лесостепной подзоне скорректированная модель описывала 73% дисперсии дыхания типичного чернозема под степной и залежной растительностью и 24% дисперсии под ясеневым лесом, а в южнотаежной подзоне – 45% дисперсии дыхания дерново-подзолов в еловом лесу, 43% на участках распада древостоя и 13% на верховых болотах. Такие оценки можно считать достаточно хорошими, поскольку на глобальном массиве данных, как в исходном, так и в параметризованном варианте модель объясняла не более 25% пространственной и временной вариабельности дыхания почвы (Reichstein et al., 2003). Тем не менее, в отдельных случаях объясняемая моделью дисперсия дыхания почв за год может быть более высокой: 31% для лесов, 41% для пашен и 57% для сенокосов (Chen et al., 2010).

Согласно составленному нами прогнозу, в ответ на повышение температуры воздуха эмиссия CO_2 из почвы должна усилиться, причем преимущественно – в южной тайге. Другие исследователи на примере Московской области, напротив, прогнозируют отрицательные тренды дыхания в лесном и луговом ценозах, что сопряжено с засухами и дефицитом осадков в весенний и летний периоды, а также холодными зимами (Курганова и др., 2020). Тем не менее наш вывод согласуется как с отсутствием выраженных трендов к изменению осадков в районах исследований, так и с тенденциями к различной реакции почвенного дыхания на повышение глобальной температуры, когда в

южных регионах происходит снижение чувствительности к температуре, а в бореальных лесах ожидается более сильный отклик на эти изменения (Carey et al., 2016).

По результатам нашей работы общую применимость модели Райха–Хашимото следует характеризовать как высокую в отношении оценки среднегодового уровня дыхания почвы и удовлетворительную при описании его внутригодовой динамики. С учетом этого, модель может быть рекомендована в качестве самостоятельного расчетного инструмента для оценки дыхания почвы. Модель пластично настраивается как на зональные условия, так и на структурно-функциональные особенности местных экосистем и может достаточно точно давать прогноз или ретроспективные оценки после ее настройки на основе многолетних рядов наблюдений.

Использованные нами временные ряды полевых наблюдений, составляющие 32–42 серии по 10 точек измерений за 5–8 лет, оказались достаточными для обратной настройки модели Райха–Хашимото на характеристики отдельных экосистем, что можно считать, в данном случае, одновременно оценкой минимально необходимого для такой процедуры объема полевых данных. Исходя из низких показателей эффективности параметризации для болотной экосистемы, характеризующейся всего тремя точками измерений в каждой серии, можно сделать вывод, что такого количества точек недостаточно и каждая серия должна содержать не менее 10 точек.

ВЫВОДЫ

Методом обратного моделирования модель Райха–Хашимото успешно параметризована для условий южной тайги в Новгородской области и лесостепи в Курской области. Скорректированные версии модели показали хорошую сходимость с многолетними результатами измерений. По результатам настройки модели увеличены исходные значения дыхания почвы при 0°C и степенные коэффициенты температурной функции, тогда как константы зависимости от осадков оказались понижены для обеих природных подзон. Согласно прогнозу, составленному на основе параметризованных версий модели, при сохранении современного темпа роста температуры воздуха, эмиссия CO_2 из дерново-подзолов в Новгородской области увеличится на 1.4–2.2% за 10 лет, а из типичных черноземов в Курской области – на 0.3–3.8%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Параметризация модели выполнена за счет средств гранта РНФ № 20-76-00023, измерения на Курской биосферной станции проводились в рамках темы гос-

задания ИГ РАН № FMGE-2019-0006, на Валдайском полигоне “лог Таежный” — темы № FMGE-2019-0007.

FUNDING

Parametrization of the model was supported by the Russian Science Foundation, project no. 20-76-00023; field measurements were carried out under the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS no. FMGE-2019-0006 at the Kursk Biosphere Station, and theme no. FMGE-2019-0007 at the Valdai polygon.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карабань Р.Т., Карелин Д.В., Калюжный И.Л., Кашин Ф.В., Конюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцев В.А., Марунин А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Трунов А.А., Шилкин А.В., Юзбеков А.К. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / под ред. Д.Г. Замолодчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
- Андреева Е.Н., Балун О.В., Журавлева О.С., Катаева О.А., Конечная Г.Ю., Крупкина Л.И., Юрова Э.А. Кадастр флоры Новгородской области. Великий Новгород: ЛЕМА, 2009. 276 с.
- Карелин Д.В., Азовский А.И., Куманяев А.С., Замолодчиков Д.Г. Значение пространственного и временного масштаба при анализе факторов эмиссии CO₂ из почвы в лесах Валдайской возвышенности // Лесоведение. 2019. № 1. С. 29–37.
<https://doi.org/10.1134/S0024114819010078>
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Ромашкин И.В., Жмурин В.А., Кудяров В.Н. Натурная и модельная оценки дыхания лесной дерново-подзолистой почвы в Приокско-Террасном биосферном заповеднике // Лесоведение. 2019. № 5. С. 435–448.
<https://doi.org/10.1134/S002411481905005X>
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хорошаев Д.А., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмурин В.А., Кудяров В.Н. Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-Террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1220–1236.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20100111>
- Смолянинов В.М., Стародубцев П.П. Комплексная мелиорация и орошение земель в Центрально-Черноземном регионе: состояние, условия развития. Воронеж: Истоки, 2011. 179 с.
- Цей Р., Шумафов М.М. Математическое моделирование и обратные задачи // Вестн. Адыгейского гос. ун-та. Сер. 4: Естественно-математические и технические науки. 2008. № 4. С. 18–24.
- Bond-Lamberty B., Thompson A. Temperature associated increases in the global soil respiration record // *Nature*. 2010. Vol. 464. P. 579–582.
<https://doi.org/10.5194/bg-7-1915-2010>
- Carey J.C., Tang J., Templer P.H. et al. Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming // *PNAS*. 2016. Vol. 113 (48). P. 13797–13802.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1605365113>
- 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 Meteorol.* 2010. Vol. 150. Is. 4. P. 590–605.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.004>
- Chen S., Zou J., Hu Z., Lu Y. Temporal and spatial variations in the mean residence time of soil organic carbon and their relationship with climatic, soil and vegetation drivers // *Global and Planetary Change*. 2020. Vol. 195. Art. 103359.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103359>
- Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O. Estimation of C–CO₂ balance of natural steppe ecosystems: Khakassia and Tuva (Eastern Siberia, Russia) case studies // *IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci.* 2020. Vol. 606. Art. 012013.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012013>
- Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations // *Biogeochemistry*. 2000. Vol. 48. Is. 1. P. 115–146.
<https://doi.org/10.1023/A:1006244819642>
- 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. № 12. P. 4121–4132.
<https://doi.org/10.5194/bg-12-4121-2015>
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Yu., Kumanyaev A.S., Lopes de Gerenyu V.O., Tel'nova N.O., Gitar'skiy M.L. The effect of tree mortality on CO₂ fluxes in an old-growth spruce forest // *European J. Forest Res.* 2021. Vol. 140 (2). P. 287–305.
<https://doi.org/10.1007/s10342-020-01330-3>
- Meyer N., Welp G., Amelung W. The temperature sensitivity (Q₁₀) of soil respiration: Controlling factors and spatial prediction at regional scale based on environmental soil classes // *Global Biogeochem. Cycles*. 2018. Vol. 32. P. 306–323.
<https://doi.org/10.1002/2017GB005644>
- Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils // *Global Biogeochem. Cycles*. 1995. Vol. 9. P. 23–36.
- Raich J.W., Potter C.S., Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94 // *Global Change Biol.* 2002. Vol. 8. Is. 8. P. 800–812.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00511.x>
- Reichstein M., Rey A., Freibauer A., Tenhunen J., Valentini R., Banza J., Casals P., Cheng Y., Grunzweig J.M., Irvine J., Joffre R., Law B.E., Loustau D., Miglietta F., 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-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices // *Global Biogeochem. Cycles*. 2003. Vol. 17 (4). Art. 1104.
<https://doi.org/10.1029/2003GB002035>

Ruane A.C., McDermid S.P. Selection of a representative subset of global climate models that captures the profile of regional changes for integrated climate impacts assessment // *Earth Perspectives*. 2017. № 4. Art. 1. <https://doi.org/10.1186/s40322-017-0036-4>

Zhou T., Shi P., Hui D., Luo Y. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q_{10}) and its implications for carbon-climate feedback // *J. of Geophys. Res.* 2009. № 114. Art. G02016. <https://doi.org/10.1029/2008JG000850>

Assessment of Soil Respiration with the Raich–Hashimoto Model: Parameterisation and Prediction

O. E. Sukhoveeva¹, * and D. V. Karelin¹

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Respiration or emission of CO₂ from soil is the most powerful outgoing flux of carbon in terrestrial ecosystems, which makes its accurate assessment and prediction one of the most important biospheric goals. Among the multitude of regression models evaluating soil respiration, we chose the accessible and widespread T&P (Raich–Hashimoto) model, which was applied to describe the available long-term series of observations of CO₂ emissions in ecosystems of the southern taiga and forest-steppe of the European part of Russia. The objects of the study were different local biotopes: meadow steppe, young fallow, and ash forest on typical chernozems of Kursk oblast, spruce forest, and its decay areas on sod-podzols, and peat bog soils in Novgorod oblast. According to the results of parameterization, the rates of soil respiration at 0°C were 1.06 to 1.54 times higher than the initial values of the Reich–Hashimoto model, the power coefficients of temperature function were 1.04 to 1.41 times greater, while the coefficients of dependence on precipitation were changed in 0.87 to 0.99 times for both geographic subzones. The corrected versions of the model showed good convergence with the results of field measurements in estimates of annual respiration rates. According to the predictions, under the current rate of increase of air temperature and the current precipitation, CO₂ emissions from sod-podzols in Novgorod oblast will increase by 1.4–2.9% over 10 years, while respiration of typical chernozems in Kursk oblast will increase by 0.3–3.8%. The model shows good plasticity with respect to zonal soil types and specific ecosystems, and it is suitable for long-term forecast and retrospective analysis of annual CO₂ soil efflux.

Keywords: sod-podzols, taiga, climate change, inverse modelling, typical chernozems, forest steppe, soil CO₂ efflux, Russia

REFERENCES

- Alferov A.M., Blinov V.G., Gitarskii M.L., Grabar' V.A., Zamolodchikov D.G., Zinchenko A.V., Ivanova N.P., Ivakhov V.M., Karaban R.T., Karelin D.V., Kalyuzhnyi I.L., Kashin F.V., Konyushkov D.E., Korotkov V.N., Korotintsev V.A., Marunich A.S., Paramonova N.N., Romanovskaya A.A., Trunov A.A., Shilkin A.V., Yuzbekov A.K. *Monitoring potokov parnikovikh gazov v prirodnykh ekosistemakh* [Monitoring of Greenhouse Gas Fluxes in Natural Ecosystems]. Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Gitarskii M.L., Blinov V.G., Eds. Saratov: Amirit Publ., 2017. 279 p.
- Andreeva E.N., Balun O.V., Zhuravleva O.S., Kataeva O.A., Konechnaya G.U., Krupkina L.I., Yurova E.A. *Kadastr flori Novgorodskoy oblasti* [Flora Cadaster of Novgorod Oblast]. Veliky Novgorod: Lema Publ., 2009. 276 p.
- Bond-Lamberty B., Thompson A. Temperature associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, vol. 464, pp. 579–582. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1915-2010>
- Carey J.C., Tang J., Templer P.H., et al. Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming. *PNAS*, 2016, vol. 113 (48), pp. 13797–13802. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605365113>
- 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. *Agric. For. Meteorol.*, 2010, vol. 150, no. 4, pp. 590–605. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.004>
- Chen S., Zou J., Hu Z., Lu Y. Temporal and spatial variations in the mean residence time of soil organic carbon and their relationship with climatic, soil and vegetation drivers. *Glob. Planet. Change*, 2020, vol. 195, 103359. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103359>
- Golubyatnikov L.L., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O. Estimation of C–CO₂ balance of natural steppe ecosystems: Khakassia and Tuva (Eastern Siberia, Russia) case studies. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 606, 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012013>
- Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, vol. 48, no. 1, pp. 115–146. <https://doi.org/10.1023/A:1006244819642>
- 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. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4121-2015>

- Karelin D.V., Azovskii A.I., Kumanyaev A.S., Zamolodchikov D.G. Role of spatial and temporal scales in factor studies of soil CO₂ fluxes in forests of Valdai Hills. *Lesovedenie*, 2019, no. 1, pp. 29–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819010078>
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Yu., Kumanyaev A.S., Lopes de Gerenyu V.O., Tel'nova N.O., Gitsarskiy M.L. The effect of tree mortality on CO₂ fluxes in an old-growth spruce forest. *Eur. J. For. Res.*, 2021, vol. 140, no. 2, pp. 287–305. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01330-3>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov V.N. Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-Terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends. *Eurasian Soil Sci.*, 2020, vol. 53, no. 10, pp. 1421–1436. <https://doi.org/10.1134/S1064229320100117>
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Romashkin I.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov V.N. Experimental and model estimates of respiration of the forest sod-podzolic soil in the Prioksko-Terrasny nature reserve. *Contemp. Prob. Ecol.*, 2020, vol. 13, pp. 813–824. <https://doi.org/10.1134/S1995425520070057>
- Meyer N., Welp G., Amelung W. The temperature sensitivity (Q₁₀) of soil respiration: Controlling factors and spatial prediction at regional scale based on environmental soil classes. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2018, vol. 32, pp. 306–323. <https://doi.org/10.1002/2017GB005644>
- Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 1995, vol. 9, pp. 23–36.
- Raich J.W., Potter C.S., Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94. *Glob. Change Biol.*, 2002, vol. 8, no. 8, pp. 800–812. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00511.x>
- Reichstein M., Rey A., Freibauer A., Tenhunen J., Valentini R., Banza J., Casals P., Cheng Y., Grunzweig J.M., Irvine J., Joffre R., Law B.E., Loustau D., Miglietta F., 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-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2003, vol. 17 (4), 1104. <https://doi.org/10.1029/2003GB002035>
- Ruane A.C., McDermid S.P. Selection of a representative subset of global climate models that captures the profile of regional changes for integrated climate impacts assessment. *Earth Perspectives*, 2017, vol. 4, 1. <https://doi.org/10.1186/s40322-017-0036-4>
- Smol'yaninov V.M., Starodubtsev P.P. *Kompleksnaya melioratsiya i oroshenie zemel' v Tsentral'no-Chernozemnom regione: sostoyanie, usloviya razvitiya* [Complex Land Melioration and Irrigation in Central Chernozem Region: Status and Conditions for Development]. Voronezh: Istoki Publ., 2011. 179 p.
- Tsei R., Shumafov M.M. Mathematical modelling and inverse problems. *Vestn. Adyg. Gos. Univ., Ser. 4: Estestvenno-Matem. i Tekhn. Nauki*, 2008, no. 4, pp. 18–24. (In Russ.).
- Zhou T., Shi P., Hui D., Luo Y. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q₁₀) and its implications for carbon-climate feedback. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, G02016. <https://doi.org/10.1029/2008JG000850>