

## ПОЧВЕННОЕ ДЫХАНИЕ И СЕКВЕСТРАЦИЯ УГЛЕРОДА (ОБЗОР)

© 2023 г. В. Н. Кудеяров\*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
ул. Институтская ул., 2, Пущино, Московская область, 142290 Россия**\*e-mail: vnikolaevich2001@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.06.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 19.06.2023 г.

Прирост концентрации углекислоты в атмосфере является триггером для активации всех процессов углеродного цикла, включая и дыхание почв (SR), поскольку вызывает не только рост парникового эффекта атмосферы, но и ее фертилизацию. Следствием фертилизации является тенденция увеличения мировой чистой первичной продукции фотосинтеза (NPP) и гетеротрофного дыхания почв (RH). Повышение глобального наземного стока углерода сопровождалось увеличением  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Мировое увеличение RH находится в связи с мировыми потерями органического углерода почв и подтверждается моделями, в соответствии с которыми среднее время пребывания органического углерода в почвенном пуле за прошлое столетие уменьшилось на 4.4 года. Для оценки уровня секвестрации C в почвах необходимо определение баланса между RH почвы и величиной нового почвенного C-стока в форме чистой биомной продукции (NBP) – устойчивой к минерализации. Сток углерода в экосистемную продукцию (NEP) определяет краткосрочную неустойчивую секвестрацию углерода.

**Ключевые слова:** общее дыхание почв, гетеротрофное дыхание почв, корневое дыхание почв, эмиссия  $\text{CO}_2$ , сток углерода, чистая первичная, экосистемная и биомная продукция фотосинтеза

**DOI:** 10.31857/S0032180X23990017, **EDN:** YUFLKS

Многие тысячелетия до середины XIX в. концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли поддерживалась ниже 300 ppm [31–33], поскольку все источники углекислого газа были в относительном равновесии с его стоком в наземные экосистемы и океан. Самый большой глобальный источник  $\text{CO}_2$  – почвенное дыхание. Промышленная революция вызвала взрывной характер роста  $\text{CO}_2$  в атмосфере, и в 2022 г. концентрация  $\text{CO}_2$  в ней достигла 417 ppm, что на 51% выше доиндустриального уровня. В течение десятилетия 2012–2021 гг. антропогенная эмиссия  $\text{CO}_2$  (индустриальная + изменение землепользования) достигала  $10.8 \pm 0.6$  Гт С/год [39, 40]) и относительно естественной эмиссии  $\text{CO}_2$  (наземные экосистемы + океан) составляла всего лишь 5% (табл. 1). Рост концентрации углекислоты в атмосфере способствовал усилению активации процессов углеродного цикла, включая и дыхание почв.

Оценки основных составляющих мирового баланса углерода со временем претерпевают изменения в связи с накоплением новых данных и их уточнением. Это хорошо видно из отчетов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) за последние 30 лет [32, 40]. Долгие годы в отчетах IPCC принималось, что

пул почвенного (органического) углерода (SOM) на Земле составлял 1500 Гт С в слое 0–100 см ( $1 \text{ Гт} = 10^{15} \text{ г}$ ). Судя по литературным данным, диапазон оценок запасов  $\text{C}_{\text{орг}}$  в почвах довольно широк. Авторы [66] цитируют источники, в соответствии с которыми запасы SOM в слое 0–100 см оцениваются в 1220–1576 Гт, а в 0–200 см – 2376–2456 Гт.

Авторы [67] обобщили данные 10 моделей, описывающих вековое изменение (1901–2010 гг.) запасов SOM и гетеротрофного дыхания почв (RH). Модели показали, что установленные мировые запасы SOM находились в интервале 425–2111 Гт С с медианой 1158 Гт С для 2010 г., а гетеротрофное дыхание почв изменялось от 35 до 69 Гт С/год с медианой 51 Гт С/год в течение 2001–2010 г. В отчете IPCC за 2022 г. [40] мировые запасы SOM оценены в 1700 Гт плюс запасы в мерзлоте – 1400 Гт С. Почти такая же оценка запасов  $\text{C}_{\text{орг}}$  в мерзлоте (1466 Гт С) была приведена в 2009 г. в работе [66]. Эти данные позволяют допустить, что при потеплении климата может усиливаться эмиссия  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  в атмосферу. Однако это допущение не делает более реальными прогнозные оценки эмиссий парниковых газов в высоких широтах, поскольку совершенно не

**Таблица 1.** Основные составляющие глобального цикла углерода в среднем за год, за период 2012–2021 гг. (по данным [39, 40])

| Источники CO <sub>2</sub>                             |            |                    | Сток                                                   |           |                   |
|-------------------------------------------------------|------------|--------------------|--------------------------------------------------------|-----------|-------------------|
| вид                                                   | Гт С/год   | % от общей эмиссии | вид                                                    | Гт С/год  | % от общего стока |
| Сжигание ископаемого топлива + карбонизация цемента   | 9.6 ± 0.5* | 4.3                | Прирост С–CO <sub>2</sub> атмосферы                    | 5.2*      | 2.3               |
| Изменение землепользования ( <i>E<sub>LUC</sub></i> ) | 1.2 ± 0.7* | 0.5                | Дополнительный (неучтенный) сток в наземные экосистемы | 3.1 ± 0.6 | 1.4               |
| Почвенное дыхание                                     | 130        | 58.9               | NPP наземных экосистем                                 | 130       | 58.8              |
| Эмиссия CO <sub>2</sub> с поверхности океана          | 80         | 36.2               | NPP океана                                             | 80        | 36.2              |
|                                                       |            |                    | Дополнительный (неучтенный) сток в океане              | 2.9 ± 0.4 | 1.3               |
| Всего                                                 | 220.8      | 100                | Всего                                                  | 221.2     | 100               |

\* Наиболее надежные величины.

ясно как сложится будущий баланс между первичной продукцией фотосинтеза (NPP) и гетеротрофным дыханием в экосистемах.

Карелин и Замолотчиков [10] показали, что в основных типах тундр в разгар вегетации выявляются устойчивые значения среднесуточной температуры в растительном пологе, при которой отмечалась температура максимума стока углерода (10–12°C) и величина, при переходе которой происходит обратимое переключение знака С-баланса на CO<sub>2</sub>-источник (14–15°C).

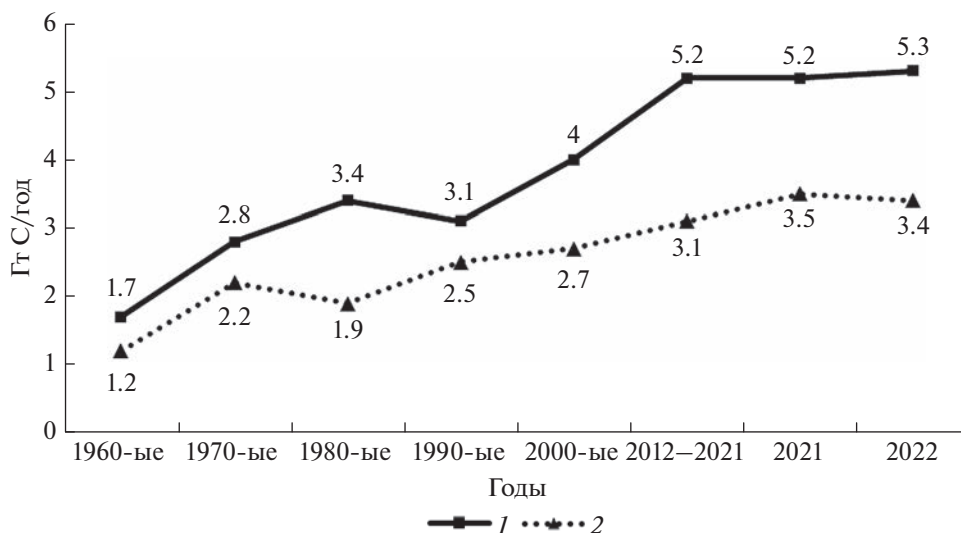
На примере Карского моря в работе [4] впервые показано, что интенсивное потепление арктического региона привело не к возрастанию, как ожидалось, а к снижению NPP. За 20 лет температура поверхностного слоя моря возросла на 3.55°C при тренде 10% в год. Величина относительной или точечной первичной продукции в столбе воды значительно уменьшалась во всех районах бассейна Карского моря. За два последних десятилетия это уменьшение составило 38 мг С/м<sup>2</sup> в день при тренде 1.1% в год. Также во всех районах зарегистрированы достоверные отрицательные тренды содержания хлорофилла *a* на поверхности моря.

Оценки основных наземных потоков углерода показывают, что за счет роста потребления ископаемого топлива эмиссия CO<sub>2</sub> в 2022 г. по сравнению с 1992 г. выросла на 4.1 Гт С/год. Эмиссия CO<sub>2</sub> за счет изменения землепользования за последние полвека удерживается на уровне 1.3 ± 0.7 Гт С/год [39].

Среднемировые темпы роста концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере существенно ниже, чем его антропогенный выброс. Авторы [40] полагают что из 10.6 Гт эмитированного в атмосферу техноген-

ного С–CO<sub>2</sub> в 2021 г. было депонировано в наземных экосистемах 3.1 ± 0.6 Гт С/год, а в океане 2.8 ± 0.4 Гт С/год. Прирост концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере составил всего 48% от общего объема выбросов CO<sub>2</sub>. Это обстоятельство всегда вызывало вопросы. Где искать “недостающее” количество CO<sub>2</sub>, которое должно было быть в атмосфере, но его там нет. Поиск этого “недостающего” углерода и идентификация процессов, приводящих к поглощению углерода, были одним из доминирующих вопросов для исследований углеродного цикла в последние десятилетия.

Работа международной группы авторов [64] посвящена поиску этого “недостающего” углерода и идентификации процессов, приводящих к поглощению углерода. Был использован набор из девяти динамических моделей глобальной растительности (DGVMs) для оценки тенденций, обусловленных глобальным и региональным климатом и обменом CO<sub>2</sub> между сушей и атмосферой. Согласно этим моделям, за период 1990–2009 гг. среднее глобальное поглощение углерода на суше составляло 2.4 ± 0.7 Гт С/год. В результате отмечены тенденции увеличивающегося стока углерода в 0.22 ± 0.08 Гт С/год. Одновременно обнаружено увеличение тенденции роста и гетеротрофного дыхания почв на 0.16 ± 0.05 Гт С/год. Увеличение стока CO<sub>2</sub> и RH почв по мнению авторов были обусловлены увеличением чистой первичной продукции естественных экосистем вследствие удобрительного воздействия на растительные сообщества повышающейся концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере. Другими словами, рост концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере вызывает ее “фертилизацию” [55]. Общая величина NPP на Земном шаре была



**Рис. 1.** Многолетняя динамика прироста атмосферного пула углерода (1) и его дополнительного стока в наземные экосистемы (2). Рисунок составлен автором по материалам [38, 39]. 1 — прирост  $C-CO_2$  в атмосфере, 2 — дополнительный наземный сток  $CO_2$ .

оценена в 62.9 Гт С/год, а в Северном полушарии без тропических регионов — 24.0 Гт С/год. При этом гетеротрофное дыхание почв Мира оценено в 57.4 Гт С/год, а почв Северного полушария без тропиков — 21.8 Гт С/год [64]. Отсюда можно сделать вывод, что бореальная зона и зона умеренного климата являются территориями стока  $CO_2$  в размере 2.9 Гт С/год. Интересен факт, что величины отношения  $RH/NPP$  для мировых экосистем Северного полушария без тропиков и тропических экосистем очень близки: 0.91, 0.91 и 0.92 соответственно, что указывает на глобальное преобладание  $NPP$  над  $RH$ .

Подтверждение нарастающей фертилизации атмосферы можно видеть из сопоставления данных по атмосферному пулу  $C-CO_2$  и данных по его дополнительному наземному стоку (рис. 1). Прирост поглощения  $CO_2$  растительностью естественно ведет к увеличению поступления в почвы растительных остатков и усилению гетеротрофного дыхания почв. Мировой рост  $NPP$ , очевидно, также связан с увеличением в бореальной зоне длительности вегетационного периода и уменьшением продолжительности снежного покрова. Этот факт подтверждается целым рядом динамических моделей глобальной растительности. Следует добавить, что спутниковые наблюдения показывают и большее “зеленение” тундры [64].

Рост почвенного дыхания подтверждается работами Бонд-Ламберти и Томсона [29, 30], собравших данные сорокалетних камерных измерений  $SR$ . Оказалось, что интегрированное глобальное  $SR$  в 2008 г. составляло  $98 \pm 12$  Гт С, оно увеличивалось на 0.1 Гт С/год в период с 1989 по 2008 гг., отражая реакцию на глобальное потепле-

ние ( $Q_{10} = 1.5$ ). Авторы показали, что бореальная, умеренная и тропическая экосистемы вкладывают в мировое годовое дыхание почв 13, 20 и 67% соответственно. Вклад бореальной экосистемы в мировое  $SR$  увеличился за этот же период почти на 7%, в то время как умеренная и тропическая экосистемы увеличили вклад примерно на 2 и 3% соответственно.

В работе [53] представлен анализ глобальных наблюдений  $SR$  за 1987–2016 гг. В общей сложности было обработано 2428 ежегодных данных  $SR$ , отобранных из 693 исследований, проведенных по всему миру. Оказалось, что во всем мире в 1987–1999 гг. почвенное дыхание увеличивалось со скоростью 27.66 г С/(м<sup>2</sup> год) (эквивалентно 0.161 Гт С/год). Эта величина практически совпадает с данными, приведенными в работе [64]. В 2000–2016 гг. интенсивность  $SR$  оставалась практически неизменной, что, как полагают авторы, было связано со сложными временными вариациями температурных аномалий и запасов углерода в почвах. Однако глобальное гетеротрофное дыхание почвы, как результат микробного разложения  $SOM$ , за весь исследуемый период (1987–2016 гг.) увеличивалось, что свидетельствует о потерях в это время органического углерода почв. Об этом говорят и данные [67], согласно которым мировое увеличение  $RH$  находится в связи с мировыми потерями органического углерода почв и подтверждается моделями, описывающими вековое изменение (1901–2010 гг.) отношений  $SOM : RH$ . Все проанализированные модели показали, что среднее время пребывания ( $MRT$  — mean residence time) органического углерода в почвенном пуле за прошлое столетие уменьшилось на 4.4 года. Вариация  $MRT$  органи-

ческого углерода почвы с учетом  $RH$  определена в диапазоне 10.8–39.3 лет. Доминантным путем потеря углерода из пула почвенного  $C_{орг}$  и определяющим фактором  $MRT$  являлось гетеротрофное дыхание почв.

### ДЫХАНИЕ ПОЧВ РОССИИ

В начале девяностых годов прошлого века в России была принята Государственная научно-техническая программа “Глобальные изменения природной среды и климата”, в рамках которой было выделено направление “Воздействие климата на биосферу”, которое возглавлял акад. Г.А. Заварзин. В этой междисциплинарной работе участвовали институты Отделения биологических наук РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова. Этот биосферный блок программы включал проект “Дыхание почв”.

По результатам первых работ в рамках проекта в 1993 г. был опубликован сборник “Дыхание почв” [5]. Примечательно предисловие к сборнику, написанное Г.А. Заварзиным [7]. Им была обрисована глобальная картина состояния цикла углерода на период начала 90-х годов прошлого века. Было отмечено, что в глобальных изменениях природной среды и климата ведущая роль принадлежит циклу углерода, с которым связаны биогеохимические циклы остальных элементов, а через парниковый эффект и состояние атмосферы, обуславливающее климат.

Цикл углерода в наземных системах, как отмечал Георгий Александрович, определяется балансом между поглощением  $CO_2$  наземной растительностью и дыханием почв. Например, в гумидном тропическом поясе интенсивный фотосинтез полностью уравнивается не менее интенсивным, а потенциально и более интенсивным дыханием почвенных организмов. Несмотря на высокую скорость оборота  $CO_2$  в годичном цикле, влияние таких экосистем на баланс  $C_{орг}$  в почве может быть незначительным. С другой стороны, возможна такая ситуация, при которой умеренный или даже слабый фотосинтез не уравнивается еще более слабым дыханием, и при этом происходит нетто-сток углерода в экосистемах. Отражением этого процесса будет накопление органического углерода в экосистеме. Крайним примером таких экосистем могут служить тундры, где происходит оторфовывание почвы и накопление органического углерода. Но в глобальном масштабе  $NPP$  тундры невелика и максимум накопления в наземных экосистемах углерода приходится на гумидный пояс Северного полушария. Именно этот пояс имеет наибольшее значение для глобального баланса углерода, поскольку аридный пояс отличается небольшой  $NPP$  и быстрым разложением органического вещества.

Российская Федерация в ее современных границах близко совпадает с естественнонаучным понятием гумидного пояса Северной Евразии. В тот же гумидный пояс входят Скандинавия, Канада, Аляска. В этом поясе находятся имеющие глобальное значение стоки и резервуары парниковых газов.

Доказательством этого положения является распределение органического углерода по экосистемам. Г.А. Заварзин [7] отмечал, что в тропических лесах органический углерод находится главным образом в биомассе, а в бореальных лесах он в гораздо большей степени находится в почве. Вклад тех и других лесов в углеродный баланс по меньшей мере одинаков. В степях, саваннах, тундре соотношение наземной биомассы и углерода почвы сильно сдвинуто в сторону почвы. Еще более сильно это соотношение выражено в болотных системах, где происходит мощное накопление торфа. При этом следует учитывать, что нетто-продукция кислорода на экосистемном уровне связана стехиометрически не столько с фотосинтезом, сколько с органическим углеродом в экосистеме. Поэтому продуцентом  $O_2$  служат те экосистемы, где происходит накопление  $C_{орг}$ . Об этом можно судить по “подстилочному коэффициенту”, т.е. отношению массы опада от массы подстилки. Этот коэффициент очень мал в тундре и велик во влажных субтропиках. Он определяется деструкцией, коррелирующей с почвенным дыханием. Поэтому крылатое выражение “легкие планеты”, относимое к тропическим лесам, совершенно неверно. На самом деле “легкими планеты” являются те области, где происходит накопление органического углерода, что позволяет идентифицировать их как увлажненные земли гумидного пояса Северного полушария, в первую очередь в России.

Другим аргументом в пользу значимости этих систем служит сезонная динамика углекислоты. В высоких широтах Северного полушария сезонная амплитуда колебаний концентрации  $CO_2$  в атмосфере наиболее велика, она постепенно уменьшается к экваториальному поясу [41]. В Южном полушарии колебания невелики и отражают общий тренд увеличения  $CO_2$  в атмосфере. Особенность баланса биологических процессов в бореальном поясе заключается в том, что поглощение углекислоты растительными экосистемами во время вегетационного периода и формирование  $NPP$  значительно превышает  $RH$ . За пределами вегетационного периода накопление  $NPP$  снижается до нуля, но эмиссия  $CO_2$  из почв, хотя и в меньшей степени, чем в теплый период продолжается. Кроме того, отопительный сезон также вносит свой вклад в повышение концентрации  $CO_2$  атмосферы в зимний период.

Многообразие почвенно-климатических условий и обширность территории России (1/8 часть суши Земли) определяют ее одно из главных мест в глобальном балансе углерода. На начало 90-х годов были накоплены обширные данные по биопродуктивности для основных почвенно-растительных зон России [2, 21]. Имелись хотя и разрозненные, но многочисленные данные по SR в различных климатических зонах. Однако отсутствовали какие-либо оценки баланса углерода на территории России. В связи с этим большую актуальность приобрели исследования по обобщению накопленных данных по дыханию почв, изучению особенностей динамики SR (суточная, декадная, сезонная, годовая, многолетняя) [17], ее связь с гидротермическим режимом, типами землепользования.

В течение вегетационного сезона определяющую роль в изменениях скорости выделения  $\text{CO}_2$  играет влажность почвы. Время кинетического ответа эмиссии  $\text{CO}_2$  на изменения внешних факторов зависит от инерционности почв и их отдельных компонентов. Проявление инерционности в циклах продуцирования и эмиссии  $\text{CO}_2$  наблюдается для разных типов почв и является закономерным. Внутрисуточные колебания SR составляют, как правило, 25–40% от среднесуточных значений SR. Варьирование SR в течение дня до 120% от среднего значения наблюдалось в условиях недостатка влаги, когда абсолютные значения SR невелики [17].

Оценка парциальной дыхательной активности почвенных бактерий и грибов представляется весьма важной, поскольку названные группы микроорганизмов характеризуются принципиально разными адаптивными возможностями и, следовательно, вкладом в эмиссию  $\text{CO}_2$  из почвы [20].

Представление о закономерностях варьирования интенсивности дыхания почвы в зависимости от имеющейся растительности и особенностей микробного комплекса почвы крайне необходимо для корректной оценки размеров выделения  $\text{CO}_2$  почвенным покровом. Поэтому столь важно оценивать вклад дыхания корней и разных групп микроорганизмов — эукариотов и прокариотов — в суммарное дыхание почвы для различных биогеоценозов [3]. Вклад дыхания корней и микроорганизмов в общее почвенное дыхание чаще всего варьирует в пределах (1 : 2)...(1 : 3), причем вклад корней для разной растительности может меняться в широких пределах [16].

В экосистемах на серой лесной почве [18] усредненный по всем исследованным экосистемам годовой вклад корней составлял 33%, однако он варьировал в широком диапазоне — от 10 до 58% от SR почвы. В агроэкосистемах величина вклада тесно связана с продолжительностью вегетационного периода сельскохозяйственных культур,

в естественных экосистемах она определяется типом почвы, экосистемой и гидротермическими условиями. В процессе дыхания корней за год в виде  $\text{CO}_2$  выделялось 16–52% от суммарных затрат углерода на рост и дыхание корней [16].

Большое значение имеют методы разделения корневого и микробного дыхания. Евдокимов с соавт. [6] экспериментально определяли вклад корневого (RA) и микробного (RH) дыхания в общую эмиссию  $\text{CO}_2$  с поверхности серой лесной и дерново-подзолистой почв в лаборатории и полевых условиях методами субстрат-индуцированного дыхания и интеграции компонентов. Оказалось, что RA в луговых экосистемах варьировало в пределах 24–60%, а в лесных — 7–56% от общей эмиссии  $\text{CO}_2$  с почвенной поверхности в зависимости от использованного метода и типа почвы.

В монографии [1] представлены результаты натурных измерений потоков парниковых газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) в природных экосистемах подзоны южно-таежных лесов северо-запада России. Разделение дыхания почвы на корневое и микробное проводили методом субстрат-индуцированного дыхания в модификации Евдокимова с соавт. [6]. Оказалось, что для здорового южно-таежного елового леса средняя оценка вклада микробного дыхания в общее почвенное составляет 65%, а корневого — 35%. Авторы показали, что вклад холодного сезона в общее почвенное дыхание в среднем за 4 года составил 30%.

В более поздних обзорах, в частности [56, 57], на большом объеме данных рассчитаны средние величины вклада корневого дыхания в общее почвенное дыхание на территории России. Получены следующие результаты (%): для лесов — 39, для кустарников — 41, для лугов — 46 и пахотных угодий 31. В среднем для всей территории России доля RA составила 40%, что близко к более ранним оценкам других авторов вклада автотрофного дыхания в общее почвенное [3, 6, 16].

Проблема эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу с поверхности тундровых почв заслуживает пристального внимания, поскольку полагают, что при потеплении климата именно тундровая зона может составить заметный вклад в глобальную эмиссию  $\text{CO}_2$ . Однако зона арктических и субарктических тундр наименее изучена в плане эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы. Сотрудниками лаборатории криологии почв ИФХиБПП РАН [19, 23, 24] обобщены экспериментальные данные по эмиссии  $\text{CO}_2$ , полученные в ходе комплексного изучения почвенного покрова Колымской низменности. Показано, что величина содержания  $\text{CO}_2$  в почве находится в прямой, а величина потока  $\text{CO}_2$  в атмосферу — в обратной зависимости от степени гидроморфизма почвенного профиля. Характерной особенностью сезонной эмиссии  $\text{CO}_2$  является осенний

**Таблица 2.** Основные пулы углерода, участвующие в его наземном круговороте

| CO <sub>2</sub> атмосферы |      | Запасы С, Гт                    |      |            |      |                              |      |
|---------------------------|------|---------------------------------|------|------------|------|------------------------------|------|
|                           |      | в почвах мира,<br>слой 0–100 см |      | в мерзлоте |      | в наземной<br>растительности |      |
| 1992                      | 2022 | 1992                            | 2022 | 1992       | 2022 | 1992                         | 2022 |
| 730                       | 875  | 1500                            | 1700 | Нет данных | 1400 | 500                          | 450  |

\* По отчетам IPCC [32, 40].

максимум концентрации CO<sub>2</sub> в почвенном воздухе, что сопряжено с началом промерзания профиля и “отжатию” CO<sub>2</sub> из промерзающего почвенного раствора и концентрированием его в незамерзающих пленках воды. Немаловажное значение имеет и снижение скорости диффузии газа из-за образования корки льда и мерзлой почвы на поверхности.

Почвенный покров — один из основных продуцентов CO<sub>2</sub> — одновременно является значительным буферным резервуаром органического и неорганического углерода, способным в зависимости от условий аккумулировать или отдавать его в окружающее пространство. При этом немаловажную роль играет карбонатная система почв. Карбонаты твердой фазы и почвенного раствора могут ассимилировать часть продуцируемой в почве углекислоты, которая таким образом может выводиться из активного круговорота и складываться. При изменении внешних условий запасы в карбонатах углерод может снова быть вовлеченным в круговорот. Показано, что орошение черноземов в первые годы сопровождается существенным увеличением эмиссии CO<sub>2</sub>, которая через несколько лет снижается почти до исходных значений. При этом резко активизируется динамика карбонатной системы почв, многократно увеличивается ее емкость как обменного, так и необменного резервуаров [22].

Первые оценки дыхания в целом почвенного покрова России были сделаны в 1995 г. [13]. На основе собранных за предшествующие 20–30 лет данных по почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> был рассчитан его общий поток в атмосферу почвами наземных экосистем России за вегетационный сезон и составлена карта-схема выделения CO<sub>2</sub> различными почвами. Карта-схема была разработана на основе данных по определению средних значений (за вегетационный период) выделения CO<sub>2</sub> почвами и по результатам анализа связи между биоклиматическими параметрами, свойствами почв и продуцированием ими CO<sub>2</sub>. Проведена группировка почвенных типов и подтипов с учетом их биоклиматических параметров, строения почвенного профиля, гумусированности и некоторых водно-физических свойств. Общая вели-

чина эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу с почвами наземных экосистем России была оценена в 3.12 Гт углерода за вегетационный сезон.

Согласно более поздним данным по круглогодичной эмиссии CO<sub>2</sub> за 20 лет показано, что за холодный период года к количеству SR за вегетационный период прибавляется еще не менее 30% [14, 15, 50, 51].

Средние показатели удельной дыхательной активности почв мира в период, благоприятный для вегетации растений (оптимальное увлажнение и температура), варьируют не в столь широком интервале и практически не зависят от географического положения региона. Среднесуточные показатели почвенного дыхания за вегетационный период в различных зонах России также не имеют зональной зависимости [20].

Основываясь на анализе и обобщении данных за 80 лет наблюдений за 57 лесами, плантациями, саваннами, кустарниками и лугопастбищами от бореального до тропического климата, авторы [27] показали, что общий годовой SR тесно связан со среднегодовой температурой почвы (SRMAT), независимо от типа экосистемы и биома. Авторы делают вывод, что достаточно измерить SRMAT для получения оценки годового SR. Это должно существенно расширить наши возможности по оценке пространственного распределения эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы по экосистемам, ландшафтам и регионам и тем самым способствовать улучшению пространственного разрешения основного компонента глобального углеродного цикла.

Многолетними натурными наблюдениями (более 20 лет) на дерново-подзолистой и серой лесной почвах (южное Подмосковье) показано, что доля холодного периода (ноябрь–апрель) в годовом потоке CO<sub>2</sub> из почв в отдельные годы могла достигать 38–39% [13].

Оценки дыхания почвенного покрова России разными авторами на протяжении последней четверти века приведены в табл. 2.

Ошибки величин гетеротрофного дыхания почвенного покрова России по данным авторов находятся в пределах не менее, чем 20%. Отсюда можно сделать вывод — различия оценок RH для

**Таблица 3.** Оценки общего дыхания почвенного покрова России различными авторами

| Ссылка                         | Общее дыхание почв | Гетеротрофное дыхание |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------|
|                                | C, млн т/год       |                       |
| Кудеяров с соавт. 1995 [13]    | 3120*              | —                     |
| Курганова, Кудеяров, 1998 [14] | 4300               |                       |
| Кудеяров, 2000 [12]            | 4300               | 2850                  |
| Kurganova, 2003 [51]           | 5670               | 2890                  |
| Nilsson et al., 2000 [58]      |                    | 3200                  |
| Mukhortova et al., [57]        |                    | 3470                  |
| Dolman A.J. et al., 2012 [37]  |                    | 3463                  |
| Mukhortova et al., 2021 [56]   |                    | 3200                  |
| Среднее                        | 5000               | 3178                  |

\* За вегетационный сезон.

почвенного покрова России, сделанные авторами в разное время, находятся в пределах погрешности определения. Необходимо подчеркнуть, что количество индивидуальных данных РН опубликованных в литературе крайне мало для такой огромной территории, как Россия, и требуются дальнейшие усилия по сбору данных и проведению наблюдений за составляющими углеродного баланса страны.

### СЕКВЕСТРАЦИЯ УГЛЕРОДА

Человечество стоит перед лицом глобальной проблемы, как при продолжающемся росте мирового производства сельскохозяйственной и промышленной продукции и энергопотребления снизить эмиссию парниковых газов. При этом для снижения парникового эффекта должно быть не только значительное сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу, но и новые технологии отъема из нее  $\text{CO}_2$  с целью последующего долговременного захоронения (секвестрации).

Термин “секвестрация углерода” подразумевает антропогенное вмешательство в усиление поглощения  $\text{CO}_2$  атмосферы экосистемами и/или технологическими приемами (карбонизация, захоронение углекислоты на больших глубинах мирового океана и др.). Другими словами, истинная секвестрация подразумевает связывание  $\text{CO}_2$  в формы “невозвратного углерода” в атмосферу в обозримом будущем. В случае земледелия секвестрация углерода заключается в наращивании в почвах запасов углерода в форме чистой биомной продукции (NBP).

Вполне обоснованно, что для разрешения проблемы секвестрации  $\text{CO}_2$  взоры обращаются, прежде всего, на возможность увеличения абсорбции углекислоты почвенно-растительным покровом, поскольку почва является основным храни-

лищем углерода, и ей принадлежит главная роль в секвестрации  $\text{CO}_2$  атмосферы. В большом объеме информации по приемам секвестрации  $\text{CO}_2$  одно из главных мест отводится минимальной обработке почв (no-till), при которой увеличение запасов  $\text{C}_{\text{орг}}$  в почвах достигается при одновременном снижении и интенсивности микробного дыхания [11, 34, 35, 44, 47, 48, 61, 62, 65].

Под термином “секвестрация углерода” в почве в большинстве работ подразумевается накопление в почве органического углерода в результате внесения в нее различных органических материалов: навоза [25, 63] компостов [36], соломы [28], биоугля [26, 38, 54, 58, 69]. Прирост общих запасов органического углерода в почвах без анализа его баланса в агроэкосистеме создает иллюзию секвестрации. Для оценки уровня секвестрации углерода в почвах необходимо обязательное определение баланса между РН почвы и величиной нового почвенного стока органического углерода в форме устойчивого к минерализации органического углерода (чистая биомная продукция, NBP). Сток углерода в NEP-продукцию (коротко живущие формы углерода с  $\text{MRT} < 100$  лет) определяет краткосрочную неустойчивую секвестрацию углерода. Переход органического углерода из NEP-пула в NBP-пул (иными словами процесс гумификации) длительный процесс и сопровождается потерей углерода в результате гетеротрофного дыхания и эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

Применение органических удобрений (прежде всего навоза) и различных компостов, являющихся NEP-продукцией, можно отнести к кратковременному типу секвестрации органического углерода. Последствия внесения свежих легкоразлагаемых органических материалов в почву вызывает прайминг-эффект, т.е. усиление минерализации почвенного  $\text{C}_{\text{орг}}$ . [68]. Затраты NPP и NEP (т С/га) на

формирование 1 т С/га в NBP-пуле могут колебаться от нескольких до десятков тонн С/га в зависимости от продолжительности и доз внесения органического удобрения в почву [12, 49]. Затраты NPP и NEP на образование единицы NBP представляют собой потери углерода в результате дыхания почвенной биоты и эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Применение органических удобрений усиливает RH почв и не обеспечивает длительную секвестрацию углерода. Однако внесение в почву органических удобрений значительно повышают ее энергетический статус, который способствует усилению соокисления и детоксикации множества загрязняющих почву веществ. Очень важно, что внесение навоза и других органических материалов способствует возврату в почвы питательных веществ, отчуждаемых с урожаями сельскохозяйственных культур.

Перспективным приемом секвестрации атмосферной  $\text{CO}_2$  является внедрение севооборотов с подсевом покровных культур. По результатам метаисследований [45] на большом количестве экспериментов сравнения (около 2000) показано, что, если бы на 15% нынешних мировых пахотных земель внедрили покровные культуры, это привело бы к увеличению SOM в почвах на  $0.16 \pm 0.06$  Гт С/год, что аналогично 1–2% текущих выбросов от сжигания ископаемого топлива или почти полностью компенсировало бы эмиссию С– $\text{CO}_2$  от изменения мирового землепользования ( $E_{\text{LUC}}$ ).

Перспективным приемом секвестрации органического углерода в почвах может служить минимальная обработка почвы (no-till), которая способствует изменению почвенного профиля в результате накопления в верхних горизонтах большего количества растительных остатков и формированию горизонта  $A_0$ . Это в свою очередь уменьшает поверхностное испарение и увеличивает запасы влаги в почвенном профиле, а также RH. Однако в определенных условиях no-till увеличивает потоки закиси азота из почвы, что может свести на нет любые климатические выгоды потенциального хранения  $\text{C}_{\text{орг}}$  в почве [61]. Комбинация минимальной обработки почвы и применения азотных удобрений может приводить к усилению эмиссии  $\text{N}_2\text{O}$ , поскольку в гумусовом горизонте из-за слабой аэрации создаются благоприятные условия для процесса денитрификации [60].

В предшествующие годы в связи с реализацией рекомендаций Киотского протокола, а в настоящее время в соответствии с Парижским климатическим соглашением пропагандируются мероприятия по усилению стока атмосферного углекислого газа за счет восстановления и расширения площадей, покрытых лесом.

Особенность накопления углерода в лесных экосистемах состоит в том, что оно происходит

только тогда, когда леса растут. Интенсивное накопление биомассы в лесах умеренной зоны наблюдается до возраста 50–70 лет, затем происходит снижение темпов прироста. В спелых насаждениях баланс  $\text{CO}_2$  приближается к нулю, а в перестойных — лес становится источником  $\text{CO}_2$ , поскольку возрастной отпад деревьев и разложение дебриса превосходят нарастание новообразованной биомассы [8, 9]. Леса часто подвергаются рискам залпового выброса  $\text{CO}_2$  в случаях лесных пожаров или массового нашествия вредителей и болезней.

Секвестрация углерода путем новых лесопосадок, безусловно, имеет определенный положительный эффект, но в долгосрочной перспективе он может быть сведен к нулю. Кроме того, ограниченность земельных ресурсов на планете, прежде всего, необходимость пахотных угодий, не позволяет безгранично расширять лесопосадки. Емкость пулов углерода наземной растительной биомассы так же, как пулы органического углерода в почвах, имеют свое ограничение, связанное с почвенно-климатическими условиями.

При обсуждении проблемы секвестрации атмосферного  $\text{CO}_2$  можно привести опыт Российской Федерации, который возник не как результат специально проведенного эксперимента, а как следствие экономического кризиса и перестройки сельского хозяйства. За период 1992–2010 гг. площадь пашни сократилась почти на 40 млн га. Невольно эти земли перешли в разряд залежных. Накопление SOM в залежных землях России за период 1990–2010 гг. могло составить 897 млн т С или около 45 млн т С/год, что компенсировало около 10% промышленной годовой эмиссии С– $\text{CO}_2$  [52].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общее почвенное дыхание — главный источник  $\text{CO}_2$  на Земле, превышает антропогенную эмиссию на порядок. Если сравнивать данные IPCC 1992 г. [32] по SR, которое оценивалось в 115 Гт С/год, а в 2022 г. — 130 Гт С/год [40], то встает вопрос можно ли считать, что разница в 15 Гт С/год (130–115) является действительной величиной роста почвенного дыхания за последние 30 лет, или это лишь уточнение данных за счет значительного расширения мировой базы данных по дыханию почв. По-видимому, может иметь место и то, и другое. Объективно рост фертилизации атмосферы и потепление климата [42, 43, 46] увеличивает NPP наземных экосистем и как следствие SR и RH.

Наиболее динамичными и объективными являются величины антропогенной эмиссии  $\text{CO}_2$ , составляющие всего лишь 4.9% от ее общей эмиссии (антропогенная + природная). Но именно прирост углекислоты в атмосфере является триггером для активации всех процессов углеродного

цикла, включая и дыхание почвы, поскольку вызывает не только рост парникового эффекта атмосферы, но и ее фертилизацию. Следствием фертилизации является тенденция увеличения мирового NPP, статистически значимый тренд которого был определен в размере  $0.22 \pm 0.08$  Гт/С/год и гетеротрофного дыхания почв с трендом в  $0.16 \pm 0.05$  Гт/С/год [64]. Однако данные по превышению тренда увеличения NPP над трендом RH находятся в противоречии с данными уменьшения среднего времени пребывания (MRT) органического углерода в почвенном пуле на 4.4 года за прошлое столетие (1901–2010 гг.) [67]. Доминантным путем потерь углерода из пула почвенного  $C_{\text{орг}}$  и определяющим фактором MRT является гетеротрофное дыхание. Другими словами, повышение глобального наземного стока углерода привело к сокращению времени его пребывания в почвенном органическом веществе.

Для оценки уровня секвестрации углерода в почвах необходимо определение баланса между RH почвы и величиной нового почвенного стока органического углерода в форме устойчивого к минерализации органического углерода (чистая биомная продукция — NBP). Сток углерода в NEP-продукцию (короткоживущие формы углерода) определяет краткосрочную неустойчивую секвестрацию углерода. Переход органического углерода из NEP-пула в NBP-пул (процесс гумификации) длительный процесс и сопровождается потерей углерода в результате гетеротрофного дыхания и эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Применение органических удобрений (прежде всего навоза) и различных компостов, являющихся чистой экосистемной продукцией, можно отнести к кратковременному типу секвестрации органического вещества. Внедрение в земледелие подсева покровных культур может оказаться эффективным приемом секвестрации углерода.

Сельскохозяйственные угодья России обладают высоким потенциалом секвестрации углерода на образовавшихся залежах. Однако в настоящее время все чаще раздаются голоса о возврате залежей в пахотные угодья. При этом следует принимать во внимание тот факт, что распашка залежей или луговых угодий приводит к быстрой потере накопленного органического углерода. Залежи в Российской Федерации образовались в основном на деградированных и сильнодеградированных почвах и в процессе их забрасывания началось восстановление, заключающееся в накоплении в почвах органического вещества. Распашка залежей без применения должных систем мелиорации, удобрений и почвосберегающих технологий возделывания неизбежно приведет к возобновлению эрозии и быстрой потере накопленного десятилетиями органического углерода.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по государственному заданию № 122040500037-6.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолотчиков Д.Г. и др. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
2. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
3. Благодатский С.А., Ларионова А.А., Евдокимов И.В. Вклад дыхания корней в эмиссию  $\text{CO}_2$  из почвы // Дыхание почвы. Пушино, 1993. С. 26–32.
4. Демидов А.Б., Гагарин В.И., Шеберстов С.В. Влияние регионального потепления на первичную продукцию Карского моря в последние две декады (2002–2021 гг.) // Океанология. 2023. Т. 63. № 2. С. 224–242.
5. Дыхание почв / Под ред. Заварзина Г.А., Кудеярова В.Н. Пушино, 1993. 130 с.
6. Евдокимов И.В., Ларионова А.А., Шмитт М., Лопес де Гереню В.О. Экспериментальная оценка вклада дыхания корней растений в эмиссию углекислого газа из почвы // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1479–1488.
7. Заварзин Г.А. Предисловие // Дыхание почвы. Пушино, 1993. С. 3–10.
8. Исаев А.С., Коровин Г.Н. Углерод в лесах Северной Евразии. Круговорот углерода на территории России // Глобальные изменения природной среды и климата. Избр. научн. труды. М., 1999. С. 63–95.
9. Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И. и др. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. (аналитический обзор). М.: Центр экол. полит., 1995. 156 с.
10. Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
11. Кирюшин В.И., Кирюшин С.В. Агротехнологии. СПб: Лань, 2015. 480 с.
12. Кудеяров В.Н. Вклад почвы в баланс  $\text{CO}_2$  атмосферы на территории России // Докл. РАН. 2000. Т. 375. № 2. С. 275–277.
13. Кудеяров В.Н., Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф. и др. Оценка дыхания почв России // Почвоведение. 1995. № 1. С. 33–42.
14. Курганова И.Н., Кудеяров В.Н. Оценка потоков диоксида углерода из почв таежной зоны России // Почвоведение. 1998. № 9. С. 1058–1070.
15. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хорошаев Д.А., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмурич В.А., Кудеяров В.Н. Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-Террас-

- ного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1220–1236.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20100111>
16. Ларионова А.А., Евдокимов И.В., Курганова И.Н., Сапронов Д.В., Кузнецова Л.Г., Лопес де Гереню В.О. Дыхание корней и его вклад в эмиссию из почвы // Почвоведение. 2003. № 3. С. 183–194.
  17. Ларионова А.А., Иванникова Л.А., Демкина Т.С. Методы определения эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы // Дыхание почвы. Пушино, 1993. С. 11–26.
  18. Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Сапронов Д.В. и др. Определение вклада дыхания корней травянистых и древесных растений в эмиссию CO<sub>2</sub> из почвы // Почвоведение. 2006. № 10. С. 1248–1257.
  19. Остроумов В.Е., Буценко А.Н. Дыхание почвы. Пушино, 1993. 142 с.
  20. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Под ред. Заварзина Г.А., Кудеярова В.Н. М.: Наука, 2007. 315 с.
  21. Паников Н.С., Палеева М.В., Дедыш С.Н., Дорофеев А.Г. Кинетические методы определения биомассы и активности различных групп почвенных микроорганизмов // Почвоведение. 1991. № 8. С. 109–120.
  22. Родин Л.Е., Базилиевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.–Л.: Наука, 1965. 253 с.
  23. Рысков Я.Г., Иванов И.В., Демкин В.А., Хакимов Р.Ф. Динамика запасов карбонатов в почвах России за историческое время и их роль как буферного резервуара атмосферной углекислоты // Почвоведение. 1997. № 8. С. 934–942.
  24. Федоров-Давыдов Д.Г. Дыхательная активность тундровых биогеоценозов и почв Колымской низменности // Почвоведение. 1998. № 3. С. 291–301.
  25. Шевцова Л.К., Романенков В.А., Блоговещенский Г.В., Хайдуков Г.В., Канзываа С.О. Структура баланса углерода и биоэнергетическая оценка его компонентов в агроценозах длительных полевых опытов // Агрохимия. 2015. № 12. С. 67–75.
  26. Ali E.F., Al-Yasi H.M., Kheir A.M.S., Eissa M.A. et al. Effect of biochar on CO<sub>2</sub> sequestration and productivity of pearl millet plants grown in saline sodic soils // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2021. V. 21. № 2. P. 897–907.  
<https://doi.org/10.1007/s42729-021-00409-z>
  27. Bahn M., Reichstein M., Davidson E.A., Grünzweig J. et al. Soil respiration at mean annual temperature predicts annual total across vegetation types and biomes // Biogeosciences. 2010. V. 7. P. 2147–2157.  
<https://doi.org/10.5194/bg-7-2147-2010>
  28. Berhane M., Xu M., Liang Z.Y., Shi J. et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis // Glob. Change Biol. 2020. V. 26. № 4. P. 2686–2701.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.15018>
  29. Bond-Lamberty B., Thomson A. A global database of soil respiration data // Biogeosciences. 2010. V. 7. P. 1915–1926.  
<https://doi.org/10.5194/bg-7-1915-2010>
  30. Bond-Lamberty B., Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record // Nature. 2010. V. 464. P. 579–582.  
<https://doi.org/10.1038/nature08930>
  31. Canadell J.G., Monteiro P.M.S., Costa M.H., Cotrim da Cunha L., Cox P.M. et al. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks // Climate Change. Cambridge, 2021. P. 673–816.  
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>
  32. Climate Change. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment / Ed. Houghton J.T. et al. Cambridge, 1992. 200 p.
  33. Climate change / Eds. Houghton J.T. et al. IPCC, 1996.
  34. Cooper H.V., Sjögersten S., Lark R.M. et al. To till or not to till in a temperate ecosystem? Implications for climate change mitigation // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. P. 054022.
  35. Dewi R.K., Fukuda M., Takashima N. et al. Soil carbon sequestration and soil quality change between no-tillage and conventional till soil management after 3 and 11 years of organic farming // Soil Sci. Plant Nutr. 2022. V. 68. № 1. P. 133–148.  
<https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1997552>
  36. Ding W., Luo J., Li J., Yu H. et al. Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N<sub>2</sub>O and fertilizer induced N<sub>2</sub>O emissions from an intensively cultivated soil // Sci. Total Environ. 2013. V. 465. P. 115–124.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.020>
  37. Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D. et al. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion method // Biogeosciences 2012. V. 9. P. 5323–5340.  
<https://doi.org/10.5194/bg-9-5323-2012>
  38. El-Naggar A., El-Naggar A.H., Shah S.M. et al. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, potential environmental risk: A review // J. Environ. Managem. 2019. V. 241. P. 458–467.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.044>
  39. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M. et al. Global Carbon Budget 2021 // Earth Syst. Sci. Data. 2022. V. 14. P. 1917–2005.  
<https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>
  40. Global Carbon Project. Supplemental data of Global Carbon Budget 2022. Version 1.0. Data set. Global Carbon Project. 2022.  
<https://doi.org/10.18160/gcp-2022>
  41. GAW DATA Greenhouse Gases and Other Atmospheric Gases. World Meteorological Organization. Japan, 2018. V. IV. 101 p.
  42. Haaf D., Six J., Doetterl S. Global patterns of geo-ecological controls on the response of soil respiration to warming // Nat. Clim. Chang. 2021. V. 11. P. 623–627.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01068-9>
  43. IPCC 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Eds: Buendia E. IPCC, 2019.

44. Jia S.X., Liang A.Z., Zhang S.X. *et al.* Effect of tillage system on soil CO<sub>2</sub> flux, soil microbial community and maize (*Zea mays* yield) // *Geoderma*. 2021. V. 384. P. 114813.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114813>
45. Jian J.S., Du X., Reiter M.S. *et al.* A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping // *Soil Biol. Biochem.* 2020. V. 143. P. 107735.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107735>
46. Jian J., Vargas R., Anderson-Teixeira K., Stell E. *et al.* A restructured and updated global soil respiration database (SRDB-V5) // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V. 13. P. 255–267.  
<https://doi.org/10.5194/essd-13-255-2021>
47. Kan Z.R., Liu W.X., Liu W.S. *et al.* Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective // *Global Change Biol.* 2022. V. 28. № 3. P. 693–710.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.15968>
48. Kan Z.R., Liu Q.Y., Virk A.L. *et al.* Effects of experiment duration on carbon mineralization and accumulation under no-till // *Soil Till. Res.* 2021. V. 209. P. 104939.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104939>
49. Kuddeyarov V.N. Soil Carbon Sequestration: Facts and Challenges (Analytical Review) // *Biol. Bull. Rev.* 2022. V. 12. P. S109–S122.
50. Kuddeyarov V.N., Kurganova I.N. Carbon dioxide emission and net primary production of Russian terrestrial ecosystems // *Biol. Fertil. Soils*. 1998. V. 27. P. 246–250.
51. Kurganova I.N. Carbon dioxide emission from Soils of Russian terrestrial ecosystems // *Laxemburg (Austria)*. 2003. 63 p.
52. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // *Catena*. 2015. V. 133. P. 461–466.
53. Lei J., Guo X., Zeng Y. *et al.* Temporal changes in global soil respiration since 1987 // *Nat Commun.* 2021. V. 12. P. 403.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-20616-z>
54. Majumder S., Neogi S., Dutta T. *et al.* The impact of biochar on soil carbon sequestration: Meta-analytical approach to evaluate environmental and economic advantages // *J. Environ. Management*. 2019. V. 250. P. 109466.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109466>
55. Melillo J.M., Prentice I.E., Farquhar G.D., Schulze E.D., Sala G.E. 9 Terrestrial Biotic Responses to Environmental Change and Feedbacks to Climate // *IPCC 1996. The Science of Climate Change*. N.Y.: Melbourne, 1996. P. 445–481.
56. Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A. *et al.* Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 785. P. 147314.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147314>
57. Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A., McCallum I., Kraxner F. Soil contribution to carbon budget of Russian forests // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2015. V. 200. P. 97–108.
58. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V. *et al.* Full carbon account for Russia. Laxemburg, 2000 180 p.
59. Oladele S.O., Adetunji A.T. Agro-residue biochar and N fertilizer addition mitigates CO<sub>2</sub>-C emission and stabilized organic carbon pools in a rain-fed agricultural cropland // *Int. Soil Water Conservation Res.* 2021. V. 9. № 1. P. 76–86.  
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.09.002>
60. Palma R.M., Rímolo M., Saubidet M.I., Conti M.E. Influence of tillage system on denitrification in maize-cropped soils // *Biol. Fertil. Soils*. 1997. V. 25. № 2. P. 142–146.  
<https://doi.org/10.1007/s003740050294>
61. Pelster D.E., Chantigny M.H., Royer I., Angers D.A. *et al.* Reduced tillage increased growing season N<sub>2</sub>O emissions from a fine but not a coarse textured soil under the cool, humid climate of eastern Canada // *Soil Till. Res.* 2021. V. 206. P. 104833.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104833>
62. Reinsch T., Struck I.J.A., Loges R., Kluss C. *et al.* Soil carbon dynamics of no-till silage maize in ley systems // *Soil and Tillage Research*. 2021. V. 209. P. 104957.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104957>
63. Rothamsted. Long-term experiments. Guide to the Classical Long-term Experiments: Datasets and sample archive. Harpenden Herts, UK. 2006 (reprinted 2012). 52 p.
64. Sitch S., Friedlingstein P., Gruber N., Jones S.D. *et al.* Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide // *Biogeosciences*. 2015. V. 12. P. 653–679.  
<https://doi.org/10.5194/bg-12-653-2015>
65. Sperow M. Marginal cost to increase soil organic carbon using no-till on U.S. cropland // *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*. 2019. V. 24. № 1. P. 93–112.  
<https://doi.org/10.1007/s11027-018-9799-7>
66. Tarnocai C., Canadell J.D., Schuur E.A., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycles*. 2009. V. 23. GB2023.  
<https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
67. Tian H., Lu C., Yang J., Banger K. *et al.* Global patterns and controls of soil organic carbon dynamics as simulated by multiple terrestrial biosphere models: current status and future directions // *Global Biogeochemical Cycles*. 2015. V. 29. № 6. P. 775–792.  
<https://doi.org/10.1002/2014GB005021>
68. Tian J., Pausch J., Yu G., Blagodatskaya E., Gao Y., Kuzyakov Y. Aggregate size and their disruption affect <sup>14</sup>C-labeled glucose mineralization and priming effect // *Appl. Soil Ecol.* 2015. V. 90. P. 1–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.01.014>
69. Yang S., Sun X., Ding J. *et al.* Effects of biochar addition on the NEE and soil organic carbon content of paddy fields under water-saving irrigation // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. V. 26. № 8. P. 8303–8311.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-04326-8>

## Soil Respiration and Carbon Sequestration

V. N. Kudeyarov\*

*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science RAS, Pushchino, 142290 Russia*

*\*e-mail: vnikolaevich2001@mail.ru*

An increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere is a trigger for the activation of all processes of the carbon cycle, including soil respiration (SR), since it causes not only an increase in the greenhouse effect of the atmosphere, but also its fertilization. The consequence of fertilization is the tendency to increase the world's net primary production of photosynthesis (NPP) and heterotrophic respiration of soils (RH). The increase in global terrestrial carbon sink was accompanied by an increase in CO<sub>2</sub> in the atmosphere. The global increase in RH is due to global losses of soil organic carbon and is confirmed by models according to which the average residence time of organic carbon in the soil pool has decreased by 4.4 years over the past century. To assess the level of C sequestration in soils, it is necessary to determine the balance between the RH of the soil and the amount of new soil C-sink in the form of net biome production (NBP) – resistant to mineralization. Carbon sink into net ecosystem production (NEP) determines short-term unsustainable carbon sequestration.

**Keywords:** total respiration of soils, heterotrophic respiration of soils, root respiration of soils, CO<sub>2</sub> emission, carbon sink, net primary, ecosystem and biome production of photosynthesis