УДК 631.43.3 doi: 10.31360/2225-3068-2025-95-329-344
EDN UZEZFV

ЭМИССИЯ CO_2 ПОЧВ САДОВЫХ АГРОЦЕНОЗОВ ВЛАЖНЫХ СУБТРОПИКОВ РОССИИ

Рогожина Е.В.

Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», г. Сочи, Россия, e-mail: rogojinaEW@yandex.ru

Рогожина Е.В. orcid.org/0000-0002-8473-4217

Изучены физико-химические свойства и эмиссия CO_2 почв садовых агроценозов Лазаревского (пос. Уч-Дере, 43°41′5″ N 39°38′14″ E) и Хостинского (43°34′3″ N 39°45′10″ E) районов города Сочи. Измерения эмиссии CO_2 агрогенно-изменённых почв (Anthrosols) проведены в феврале, апреле, июне, октябре 2024 года, в марте и июле 2025 года *in situ*-методом закрытых камер с помощью портативного инфракрасного газоанализатора под агроценозами персика (*Persica vulgaris* Mill.), мандарина (*Citrus reticulat*a Blanco), чая (*Camellia sinensis* L. Kuntze), фундука (*Corylus maxima* Mill.). Фоновыми почвами являлись бурозёмы (Cambisols) естественных биогеоценозов (лес) и варианта полевого опыта под чаем без внесения удобрений, расположенные на сопряженных с агроценозами территориях. Агрохимические свойства желтозёмов (Acrisols) и эмиссия CO_2 изучена под садом фейхоа (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret.). Все измерения эмиссии CO_2 сопровождались отбором почвенных образцов, в которых были определены физико-химические показатели почв. В агрогенно-изменённых бурозёмах отмечено повышение кислотности почвенного раствора pH_{KCl} относительно фона (под персиком, мандарином, чаем и фундуком в среднем на 1,3, 1,0, 1,0 и 0,6 ед., соответственно); увеличение концентрации подвижных фосфатов на порядок; снижение содержания гумуса в среднем на 1 %, за исключением почв под чаем, где агротехнические приёмы возделывания культуры (удобрения и растительная подстилка из обрезочного материала) создают условия для увеличения запасов гумуса в среднем на 0,8 % по сравнению с фоном. Наблюдалось снижение влажности на 13–15 % и повышение температуры на 1,0–1,5 °С почв под персиком и мандарином относительно фона, а также более высокая влажность (на 4–9 %) почв чайной плантации по сравнению с естественным ценозом. В среднем за период исследования интенсивность потока углекислого газа из почв персиковых садов на 12 % выше по сравнению с фоном, что обусловлено в большей степени наличием задернения. Эмиссия CO_2 почв под мандаринами в среднем имела значения ниже фоновых на 20 %, что связано в основном с влиянием удобрений, пестицидной нагрузкой в весенний период. Снижение эмиссии под чаем на 21 % происходило, вероятно, также по причине влияния длительного применения удобрений и отсутствия задернения.

Ключевые слова: дыхание почв, бурозёмы, желтозёмы, агрогенная нагрузка, Сочинское Причерноморье.

Введение. Трансформация ландшафтов от естественных региональных к агрогенно-преобразованным приводит к трансформации химических свойств почв [22, 23], изменению пулов и потоков углерода в почве, важным показателями которых является эмиссия CO_2 [1, 2, 9]. Эмиссия CO_2 почв может являться сегодня важным диагностическим показателем экологического благополучия экосистемы и применяться для создания сбалансированных по углеродному обмену агроценозов [12]. Сложность оценки вклада почв агроценозов в углеродный баланс и общий баланс парниковых газов обусловлена тем, что в результате использования агротехнических приёмов возделывания культур агроэкосистема является гетерогенной в течение периода вегетации. Эмиссия CO_2 почв суммирует отток углерода в основном в результате жизнедеятельности микроорганизмов и корневого дыхания [14] и как следствие оказывается зависимой от комплекса факторов, определяющих биологическую активность почв и физиологическую активность корневых систем растений.

Большой научный практический опыт по изучению проблемы углеродного баланса почв позволяет говорить о зависимости показателя эмиссии CO_2 от целого ряда факторов: гидротермических условий, типа почвы, содержания органического вещества и элементов питания в почве, вида растительности и стадии её вегетации, применения агротехнических приёмов возделывания (удобрения, пестициды) [15, 16, 17].

Интенсивность эмиссии CO_2 часто отрицательно коррелирует с содержанием почвенного органического вещества, что указывает на потерю углерода. Этот процесс усугубляется внесением минеральных удобрений, которое стимулирует эмиссию и усиливает отток углерода из агроэкосистемы. [4].

Садовые агроценозы субтропической зоны России (Сочинское Причерноморье) сегодня изучены на предмет влияния агротехнических технологий на физико-химические свойства почв, пул углерода, биологические показатели [6, 7, 8]. Процесс эмиссии CO_2 почвами *in situ* приборными методами ранее не изучался.

Расширение этих исследований, выявление диагностических показателей, определяющих уровень депонирования углерода почвами агроценозов, оценка вклада агрогенных почв в поток углерода и продвижение идеи развития агроценозов региона как экологически управляемых систем, является актуальным.

В связи с этим ***цель данной работы*** – изучение химических свойств и эмиссии CO_2 почв агроценозов Сочинского Причерноморья и выявление факторов, влияющих на её интенсивность.

Объекты и методы исследования. Исследования проводились на участке Опытного поля ФИЦ СНЦ РАН (Хостинский район, 43°34′3″ N 39°45′10″ E) на бурых лесных слабоненасыщенных почвах (БС) под агроценозами персика и мандарина; на площадях ЗАО «Дагомысчай» в посёлке Верхнее Уч-Дере (Лазаревский район, 43°41′5″ N 39°38′14″ E) на бурых лесных кислых почвах (БК) под чайной плантацией (длительный полевой многофакторный опыт) и постагрогенным фундучником; на территории сада-музея «Дерево-Дружбы» под фейхоа. В качестве фона (эталон) изучены почвы естественных биогеоценозов, расположенные на сопряженных с агроценозами территориях – кленово-дубово-вязовый и дубово-грабовый лес. В соответствии с Классификацией почв России (2004) и World Reference Base for Soil Resources WRB 2014 года почвы естественных ценозов относятся к бурозёмам типичным (Cambisols) и желтозёмам типичным (Acrisols), почвы агроценозов – к агрозёмам (Anthrosols) [20]. Исследуемые сельскохозяйственные почвы сформировались под воздействием агротехнических приёмов возделывания культур: внесение минеральных удобрений в поверхностный слой почвы (персик: для молодых насаждений – N100P50K70, для полновозрастных – N180P90K130; мандарины – N150P150K250; чай – N240P70K90; фундук – N180P120K120; фейхоа – N120P120K120); применение пестицидов (персик и мандарины: бордоская жидкость (д.в. сульфат меди $CuSO_4$); Скор, КЭ (д.в. дифеноконазол, 250 г/л); Фундазол, СП (беномил, 500 г/кг), Делан, ВГ (д.в. дитианон, 700 г/кг); Каратэ Seon, МКС (д.в. лямбда-цигалотрин, 50 г/л). Следует отметить, что все культуры возделывались при естественном задернении, однако в условиях чайной плантации в междурядье шпалеры происходило образование растительной подстилки из опада и обрезочного материала. Характеристика растительности изучаемых ценозов представлена в таблице 1.

Погодные условия в период исследования являлись типичными для Сочинского Причерноморья. Средняя годовая температура воздуха в 2024 г. соответствовала +16,1 °С при общем количестве осадков 1 587 мм. Среднемесячная температура составляла: в феврале +9,9 °С, в апреле +16,8 °С, в июне +23,2 °С, в октябре +15,5 °С, апрель и июнь характеризовался дефицитом осадков (по 2 мм), а февраль и октябрь – избытком (161 мм и 203 мм, соответственно). В 2025 году среднемесячная температура воздуха в марте составляла 11,7 °С, а в июле – 25,2 °С, а количество осадков – 64 мм и 46 мм, соответственно [11].

Таблица 1. Характеристика фитоценозов

Table 1. Characteristics of phytocenoses

Шифр	Название фитоценоза	Месторасположение Землепользование	Растительность
Бурые лесные слабоненасыщенные (бурозём типичный – Cambisols)			
$БС_{Л}$	Кленово-дубово-вязовый лес (фон)	Хостинский район, г. Сочи, естественный фитоценоз	Дикорастущая древесно-кустарниковая растительность с отсутствием травянистого покрова и незначительной подстилкой на почве; доминируют клён остролистный (*Acer platanoides* L.), дуб скальный (*Quercus petraea*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), смилакс (*Smilax* L.), лавр благородный (*Láurus nobilis* L.)
$БС_{П10}$	Пар-Персик (10 лет)	Хостинский район, г. Сочи Опытное поле ФИЦ СНЦ РАН, агроценоз	Сорная травянистая растительность: пырей ползучий (*Elytrigia repens* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* F.H. Wigg.), клевер ползучий (*Trifolium repens* L.)
$БС_{П3}$	Пар-Персик (3 года)	Хостинский район, г. Сочи Опытное поле ФИЦ СНЦ РАН, агроценоз	Злаковая растительность: мятлик луговой (*Poa pratensis* L.)
$БС_{М30}$	Мандарин (30 лет)	Хостинский район, г. Сочи Опытное поле ФИЦ СНЦ РАН, агроценоз	Травянистая растительность: листоколосник съедобный (*Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Hou), паспалум расширенный (*Paspalum dilatatum* Poir.)
Бурые лесные кислые (бурозём типичный – Cambisols)			
$БК_{Л}$	Буково-грабовый лес (фон)	Лазаревский район, пос. Верхнее Уч-Дере, г. Сочи, естественный фитоценоз	Широколиственный лес с мощной лесной подстилкой и дикорастущими формами травянистых растений; неравномерный травянистый покров; бук кавказский (*Fāgus orientālis* L.), граб обыкновенный (*Carpinus betulus* L.), ежевика кавказская (*Rubus caucasicus* L.), смилакс (*Smilax* L.)
$БК_{Ч40}$ (N0P0K0)	Чайная плантация без удобрений (N0P0K0) – фоновый вариант опыта (40 лет)	Лазаревский район, пос. Верхнее Уч-Дере, г. Сочи ЗАО «Дагомысчай», агроценоз	Травянистая растительность: листоколосник съедобный (*Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Hou), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), паспалум расширенный (*Paspalum dilatatum* Poir.)
$БК_{Ч40}$ (N240P70K90)	Чайная плантация с внесением удобрений в дозе N240P70K90. (40 лет)	Лазаревский район, пос. Верхнее Уч-Дере, г. Сочи ЗАО «Дагомысчай», агроценоз	Опад и обрезочный материал чайного растения

$БК_{ФУН40}$	Постагрогенный фундучник (40 лет)	Лазаревский район, пос. Верхнее Уч-Дере, г. Сочи ЗАО «Дагомысчай»,. агроценоз	Лесная подстилка, незначительный травяной покров из дикорастущих сезонных трав
Желтозём типичный (Acrisols)			
$Ж_{ФЕЙХ10}$	Фейхоа (10 лет)	Хостинский район г. Сочи. Сад-музей «Дерево Дружбы» ФИЦ СНЦ РАН, естественноподобный фитоценоз	Травянистая растительность: листоколосник съедобный (*Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Hou), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), паспалум расширенный (*Paspalum dilatatum* Poir.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* F.H. Wigg.), клевер ползучий (*Trifolium repens* L.), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.)

Почвенную эмиссию CO_2 измеряли *in situ* (в полевых условиях) методом закрытых камер [10] с помощью портативного инфракрасного CO_2-газоанализатора, выполненного с использованием датчика SCD41 [18]. Для проведения замеров концентрации CO_2 на каждой точке отбора в 3-кратной повторности на расстоянии от 3–5 м друг от друга в почву на глубину 2 см врезали основание камеры, площадь которой составляла 165 см^2, объём – 560 мл. Для перемешивания воздуха внутри камеры использовали встроенный вентилятор. Предварительно за 30 мин до измерения с поверхности почвы удаляли надземные части травянистых растений. Прибор калибровался от значения 400 ppm. Замер концентрации CO_2 проводили в течении 5–7 мин на каждой точке. Всего было проведено 27 единичных измерений эмиссии на 9 участках. Одновременно проводили измерение температуры и влажности приземного слоя воздуха.

Удельная скорость эмиссии углерода рассчитывалась по формуле:

$$C = \frac{k \cdot 720 \cdot V \cdot 12 \cdot 273}{22.4 \cdot S \cdot 100 \cdot (273 + t_{средн})}. \qquad \frac{мг}{час \cdot м^2}$$

где: k – скорость возрастания концентрации CO_2

720 – число пятисекундных интервалов в часе

V – объём воздуха, в котором измеряется скорость изменения концентрации CO_2, *миллилитры*

12 – молярная масса углерода, *граммы*

22.4 – объём моля газа при н.у., *литры*

S – площадь накрытой камерой прибора почвы

100 – коэффициент, учитывающий перевод мл в л. в и миллионных долей концентрации в тысячные грамма

273 и 273+t – учёт текущей температуры.

В точках измерения эмиссии CO_2 были отобраны пробы верхнего гумусированного почвенного слоя (0–10 см) в полотняные мешочки для получения физико-химических показателей почв. Агрохимические показатели определялись по общепринятым стандартным методикам: pH_{H2O} и pH_{KCl} (соотношение почва: раствор 1 : 2.5) – потенциометрически (ГОСТ 26423-85 и ГОСТ 26484-85, соответственно); гумус – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91); фосфор подвижный – по Ониани (для кислых почв) и Олсену (для нейтральных и слабощелочных почв) (прибор УСФ 01); калий обменный – по Ониани (для кислых почв) и Масловой (для нейтральных и слабощелочных почв) со спектрометрическим окончанием (прибор КВАНТ - АФА); аммиачный азот – колориметрическим методом с реактивом Несслера; влажность – весовым методом.

Для статистической обработки экспериментальных данных использовали метод главных компонент. Изображение строилось при помощи библиотеки matplotlib. Непосредственно для выделения главных компонент применялась модель sklearn.decomposition. PCA. Исходные параметры (физико-химические свойства, эмиссия CO_2 почв) предварительно обрабатывались sklearn.preprocessing. Standard Scaler. чтобы исключить влияние разных масштабов величин. Для построения диаграмм и расчёта статистических параметров использовалась программа Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Оценка химических свойств почв показала, что бурозёмы естественных ценозов (фон) характеризовались тяжёлым механическим составом (средние суглинки) [6, 7], в среднем имели слабокислую (бурые лесные слабоненасыщенные) или кислую (бурые лесные кислые) реакцию почвенного раствора (pH_{KCl} 6,03 и 4,37 ед., соответственно), являлись низкогумусированными (4,6 и 5,7 %, соответственно), характеризовались средним содержанием аммиачного азота (45,7 и 73,4, мг/кг, соответственно) и подвижного фосфора (68,6 и 62,0 мг/кг, соответственно); имели высокую обеспеченность калием (106,9 и 425,6 мг/кг, соответственно).

В агрогенно-изменённых бурых лесных кислых почвах отмечено статистически достоверное повышение кислотности почвенного раствора относительно фона (pH_{KCl} под чаем и фундуком ниже в среднем на 1,0 и 0,6 ед., соответственно); в бурых лесных слабоненасыщенных почвах персикового и мандаринового сада можно отметить лишь тенденцию к подкислению по сравнению с фоном. В почвах всех агроценозов определено увеличение концентрации подвижных фосфатов на порядок; снижение содержания гумуса в среднем на 1 %, за исключе-

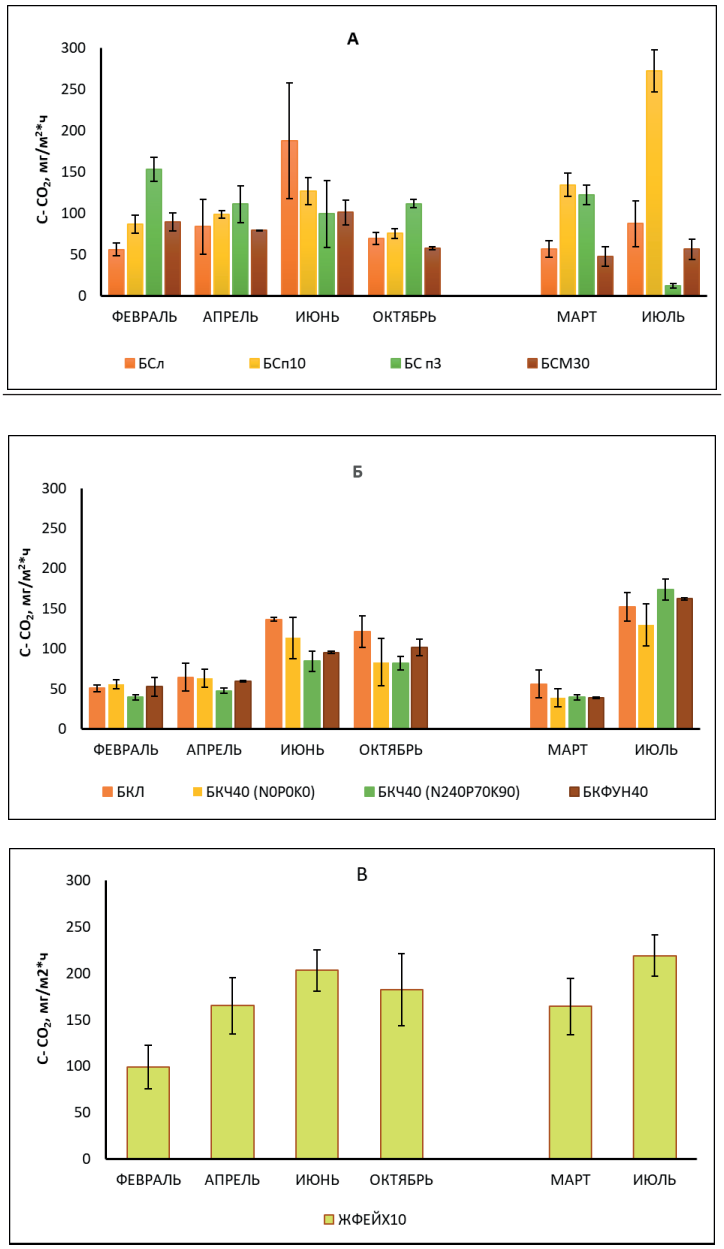
нием почв под чаем, где агротехнические приёмы возделывания культуры (удобрения и растительная подстилка из обрезочного материала) создают условия для увеличения запасов гумуса в среднем на 0,8 % по сравнению с фоном (табл. 2). Отмечено снижение влажности на 13–15 % и повышение температуры на 1,0–1,5 °С почв под персиком и мандарином относительно фона, а также более высокая влажность (на 4–9 %) почв чайной плантации по сравнению с естественным ценозом. Желтозём под фейхоа имел кислую реакцию почвенного раствора (в среднем pH_{KCl} 5,16 ед.), низкое содержание гумуса (в среднем 3,6 %) и среднюю обеспеченность основными питательными элементами (подвижный фосфор – 65,5 мг/кг; обменный калий – 63,0 мг/кг; аммиачный азот – 52,4 мг/кг). За период исследования влажность почвы под фейхоа изменялась в диапазоне от 15 до 43 %, а температура – от +13 °С до +27 °С. Отмечено, что в течение всего периода исследования температура почвы под фейхоа на 2–3 °С выше по сравнению с бурозёмами (как естественными, так и агрогенно-изменёнными), что обусловлено расположением насаждений вблизи моря на прибрежной террасе.

Сезонные измерения эмиссии CO_2 почв естественных биогеоценозов позволили определить диапазоны варьирования показателя для бурых лесных слабоненасыщенных – от 56,5 до 187,4 С–СО2 мг/(м^2 ч); для бурых лесных кислых – от 51,0 до 152,2 С–CO_2 мг/(м^2 ч) (рис. 1), что сопоставимо со значениями, определяемыми в почвах основных типов лесных экосистем Московской области в период активной вегетации [16]. Максимальные значения показатель эмиссии CO_2 имел в июне, а минимальные – в феврале, что обусловлено влиянием температуры на биологическую активность почв и физиологическую активность корней растений [3, 15]. В среднем за период исследования интенсивность потока углекислого газа из почв под персиком на 12 % выше по сравнению с фоном. В большей степени, наблюдаемые отклонения от фона обусловлены, вероятно, наличием травяного покрова. Так, максимально высокие (в 3 раза выше фона) значения эмиссии CO_2 почв молодого персикового сада $БК_{ПЗ}$ в феврале 2024 г. отмечены в период активного роста злаково-луговой растительности, а полное усыхание травяного покрова после боронования в июне 2024 г. и июле 2025 г. привело к снижению интенсивности потока углекислого газа на 21 и 86 %, соответственно, относительно фонового. Возможно, что применяемые дозы удобрений в саду $БК_{ПЗ}$ также оказывали стимулирующее влияние на эмиссию CO_2 почв, способствуя росту дикорастущих злаков и активности ризосферного микробного сообщества. Повышение эмиссии CO_2 почв под злаковыми культурами в период наибольшего влияния удобрений, отмечали и другие исследователи [3].

Таблица 2. Агрохимические показатели исследуемых почв (слой 0–10 см) (2024 г.)

Table 2. Agrochemical parameters of the studied soils (0–10 cm layer) (2024)

Показатели	Температура, °C	Влажность, %	pH_{H_2O}	pH_{KCl}	$C_{орг.}$ %	P_2O_5	K_2O	NH_4
						мг/кг		
Бурые лесные слабоненасыщенные								
Кленово-дубово-вязовый лес (фон)	13–22	30–56	5,85–7,40	5,05–6,97	1,84–3,64	18,7–96,4	69,8–133,9	30,1–54,7
Пар-Персик (10 лет)	13–25	20–51	5,42–5,75	4,44–5,20	1,61–2,51	107,6–274,0	55,8–99,2	32,2–43,0
Пар-Персик (3 года)	13–25	10–46	6,70–7,30	6,55–6,90	0,92–1,78	403,2–558,5	63,3–144,1	30,0–43,2
Мандарин (30 лет)	13–25	20–38	5,35–6,57	4,90–5,80	1,51–2,30	436,4–730,0	50,0–132,5	34,3–104,4
Бурые лесные кислые								
Буково-грабовый лес (фон)	12–20	31–46	5,40–5,65	4,20–4,46	1,98–4,33	56,1–62,3	334,4–507,6	47,8–96,5
Чай N0P0K0 (40 лет)	13–23	37–51	4,65–5,55	3,80–4,15	1,75–3,31	249,3–362,0	222,0–421,5	27,6–77,7
Чай N240P70K90 (40 лет)	12–21	43–56	3,80–4,69	3,20–3,60	2,42–4,60	475,2–1024,5	293,2–543,4	62,2–274,4
Постагрогенный фундучник (40 лет)	12–20	27–56	5,05–5,30	3,67–4,05	1,34–3,53	156,6–704,3	280,4–376,8	41,9–114,2
Желтозём								
Фейхоа (10 лет)	13–25	15–43	5,80–6,15	5,00–5,55	1,16–2,88	27,2–233,8	30,1–106,1	49,1–66,7



Условные обозначения: *$БС_{Л}$ – лес; $БС_{П10}$ – персик 10 лет; $БС_{П3}$ – персик 3 года; $БС_{М30}$ – мандарин 30 лет; $БК_{Л}$ – лес; $БК_{Ч40(N0P0K0)}$ – чай 40 лет без удобрений; $БК_{Ч40\ (N240P70K90)}$ – чай 40 лет с удобрениями $БК_{ФУН40}$ – фундук 40 лет; $Ж_{ФЕЙХ10}$ – фейхоа 10 лет*

Рис. 1. Сезонная динамика эмиссии CO_2 почв естественных биогеоценозов и садовых агроценозов влажных субтропиков России: А – бурые лесные кислые почвы (БК); Б – бурые лесные слабоненасыщенные почвы (БС); В – желтозёмы (Ж) (2024–2025 гг.)

Fig. 1. Seasonal dynamics of CO_2 emissions from soils of natural biogeocenoses and garden agrocenoses of the humid subtropics of Russia: A – acidic Cambisols; B – slightly unsaturated Cambisols; C – Acrisols (2024–2025)

Эмиссия CO_2 почв под мандаринами ($БС_{М30}$) в среднем ниже фоновых значений на 20 %, что связано с высокой пестицидной нагрузкой в весенний период (март-апрель) и более низкой влажностью почв сада по сравнению с фоном (в среднем 27 и 42 %, соответственно). Возможно, более низкая интенсивность эмиссии обусловлена и незначительным количеством опада под вечнозелёной культурой и как следствие, низкой активностью почвенного микробного сообщества, ориентированного на минерализацию свежего органического вещества. Снижение эмиссии CO_2 под чаем на 21 % по сравнению с фоном за весь период исследования происходило по причине влияния длительного применения значительных доз удобрений (N240P70K90) и отсутствия травяного покрова. Важным фактором являлась более низкая активность микробного сообщества, минерализующего опад и обрезочный материал чайного растения, богатый фенольными биоингибиторами [6]. Постагрогенный фундучник ($БС_{ФУН}$) оказался наиболее приближенным к фону по интенсивности эмиссии почвами CO_2, достоверно значимое снижение показателя отмечено только в июне. Для желтозёма под фейхоа показатель эмиссии CO_2 почв варьировал в сезонной динамике от 99,0 до 219,3 С–CO_2 мг/(м^2 ч), более высокая интенсивность эмиссии CO_2 почв по сравнению с почвами других фитоценозов обусловлена, вероятно, влиянием двух факторов – температуры и вклада корневого дыхания плотного травяного покрова злаково-луговой ассоциации.

Статистический анализ данных эмиссии CO_2 почв выявил, что вариабельность показателя в лесных экосистемах имела значения в среднем в 2 раза выше, что связано с гетерогенностью свойств почв естественных биогеоценозов и отмечалось ранее другими исследователями [21] (табл. 3).

Отмечено, что в условиях изучаемых агроценозов показатель эмиссии CO_2 почв имел среднюю положительную корреляционную зависимость с температурой (r = 0,5) и слабую отрицательную степень связи с влажностью почв (r = – 0,3), подвижным фосфором (r = – 0,3), обменным калием (r = – 0,3). Снижение содержания фосфора и калия в почвах на участках с высокой скоростью эмиссии CO_2 связано, возможно, с потреблением их быстрорастущими травами [13].

Выявленные различия химических свойств и показателя эмиссии CO_2 почв различных агроценозов региона легли в основу модели распределения объектов исследования (рис. 2). Наблюдалось разделение объектов исследования в зависимости от подтипа почв и интенсивности потока CO_2. Максимально полярные положения на модели заняли агроценозы чая $БК_{Ч(N240P70K90)}$ и молодого персика $БС_{П3}$, имеющие противоположные тренды накопления углерода.

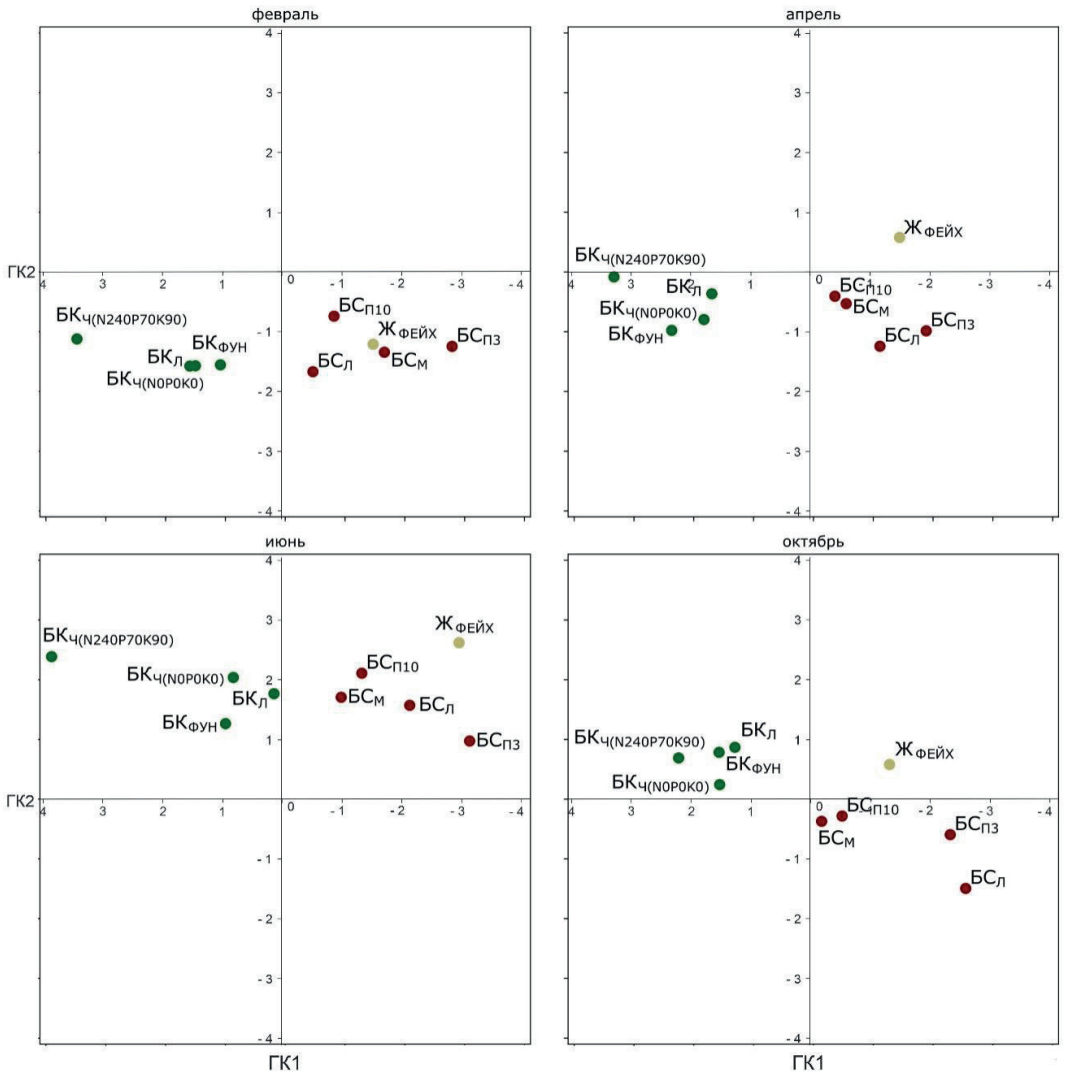


Рис. 2 Модель распределения точек исследования методом главных компонент (2024 г.)

Fig. 2. Principal Component Analysis (PCA) model for survey point distribution (2024)

Таблица 3. Статистические показатели эмиссии CO_2 естественных и агрогенно-изменённых почв (2024 г.)

Table 3. Statistical indicators of CO_2 emissions from natural and agrogenically modified soils (2024)

Шифр	Тип земле-пользования	*Max*	*Min*	Сред-нее	Вариа-бельность, V, %	Размах
Бурые лесные слабоненасыщенные (бурозём типичный – Cambisols)						
$Б_{С}л$	Кленово-дубо-во-вязовый лес (фон)	187,4	56,0	99,0	61	104,3
$БС_{П10}$	Пар-Персик (10 лет)	126,8	75,4	96,8	23	96,8
$БС_{П3}$	Пар-Персик (3 года)	152,7	98,9	118,4	20	118,4
$БС_{М30}$	Мандарин (30 лет)	101,0	57,3	81,5	23	81,5
среднее для агроценозов		126,8	77,2	98,9	22	98,9
Бурые лесные кислые (бурозём типичный – Cambisols)						
$БК_{Л}$	Буково-грабо-вый лес (фон)	136,7	51,0	50	45	93,4
$БК_{Ч40}$ (N0P0K0)	Чай N0P0K0 (40 лет)	113,4	55,6	85,7	33	78,9
$БК_{Ч40}$ (N240P70K90)	Чай N240P70K90 (40 лет)	84,5	39,6	57,8	36	63,5
$БК_{ФУН40}$	Постагрогенный фундучник (40 лет)	102,1	39,6	44,9	32	77,4
среднее для агроценозов		100,0	49,3	49,4	34	73,3
Желтозём типичный (Acrisols)						
$Ж_{ФЕЙХ10}$	Фейхоа (10 лет)	203,3	99,0	51	28	162,5

Выводы. Полученные результаты подтверждали существующие представления о трансформации химических свойств почв многолетних садовых агроценозов Сочинского Причерноморья под влиянием агрогенной нагрузки относительно почв естественных биогеоценозов

(лес). Отмечено изменение гидротермического режима агропочв: повышение влажности в среднем на 7 % и снижение температуры почвы на 1–2 °С под чаем; более низкая влажность (на 14 %) и более высокая температура (на 1,6 °С) под персиком и мандарином. В агроценозах персика, мандарина, чая и фундука наблюдалось снижение pH_{KCl} в среднем на 1 % относительно фона и содержания гумуса на 1 % (за исключением чая, где отмечено его увеличение на 0,8 %), а также увеличение на порядок содержания подвижных фосфатов. Измерения эмиссии CO_2 почв в сезонной динамике позволили определить диапазоны варьирования показателя для бурозёмов естественных ценозов от 51,0 до 187,4 С–CO_2 мг/(м^2 ч), а для агрогенно-преобразованных – от 39,6 до 152,7 С–CO_2 мг/(м^2 ч). Эмиссия CO_2 агрогенно-преобразованных желтозёмов варьировала от 99,0 до 203,3 С–CO_2 мг/(м^2 ч). Важными факторами, влияющими на интенсивность эмиссии CO_2 почвами агроценозов, являлись: температура, влажность, обеспеченность питательными элементами, что подтверждалось наличием корреляционных связей. Предположительно, на показатель эмиссии CO_2 почв под культурами оказали влияние такие агротехнические приёмы как внесение минеральных удобрений, пестицидов, задернение; возможно, важным являлось наличие в растительном опаде и обрезочном материале чая веществ-биоингибиторов (фенолы). Каждый агроценоз требовал индивидуального анализа и выделения главных факторов, определяющих интенсивность эмиссии CO_2. В связи с этим, получить информативное заключение о вкладе сельскохозяйственных почв Сочинского Причерноморья в общий поток углерода и общий баланс парниковых газов возможно только при применении единого подхода в оценке эмиссии CO_2 с учётом всех обозначенных факторов.

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ СНЦ РАН FGRW-2021-0010, № госрегистрации 122032400081-5

Список литературы/References

1. Гедгафова Ф.В., Горобцова О.Н., Улигова Т.С., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М. Оценка изменения биологической активности горных серых лесных почв Центрального Кавказа (Терский вариант поясности в пределах Кабардино-Балкарии) в результате агроиспользования, Агрохимия. 2019; 4 : 23-30. [Gedgafova F.V., Gorobtsova O.N., Uligova T.S., Tembotov R.Kh., Khakunova E.M. Assessment of changes in biological activity of mountain gray forest soils of the Central Caucasus (Terek variant of zonation within Kabardino-Balkaria) as a result of agricultural use, Agrochemistry. 2019; 4 : 23-30. (In Rus)]. DOI: 10.1134/S0002188119040069.

2. Горобцова О.Н., Улигова Т.С., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М. Оценка уровня био-

логической активности агрогенных и естественных чернозёмов Кабардино-Балкарии, Почвоведение. 2017; 5 : 614-623. [Gorobtsova O.N., Uligova T.S., Tembotov R.Kh., Khakunova E.M. Assessment of the level of biological activity of agrogenic and natural chernozems of Kabardino-Balkaria, Soil Science. 2017; 5 : 614-623. (In Rus)]. DOI: 10.7868/S0032180X17030042.
3. Дёмин Е.А., Миллер С.С., Ахтямова А.А. Влияние минеральных удобрений и температуры почвы на эмиссию углекислого газа в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья, Земледелие. 2024; 1 : 17-22. [Demin E.A., Miller S.S., Akhtyamova A.A. The influence of mineral fertilizers and soil temperature on carbon dioxide emissions in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Urals, Agriculture. 2024; 1 : 17-22. (In Rus)]. DOI: 10.24412/0044-3913-2024-1-17-22.
4. Дёмин Е.А., Ахтямова А.А., Каюгина С.М. Влияние минеральных удобрений на эмиссию углекислого газа в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья, Международный научно-исследовательский журнал. 2024; 1(139) ? [Demin E.A., Akhtyamova A.A., Kayugina S.M. The influence of mineral fertilizers on carbon dioxide emissions in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Urals, International Research Journal. 2024; 1(139) ? (In Rus)]. DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.112.
5. Классификация и диагностика почв России. Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена. 2004; 341 с. [Classification and Diagnostics of Soils of Russia. Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oikumena. 2004; 341 p. (In Rus)]. ISBN: 5-93520-044-9.
6. Малюкова Л.С., Рогожина Е.В., Струкова Д.В. Биологическая активность агрогенно-изменённых почв влажных субтропиков России. Сочи. ФИЦ СНЦ РАН. 2023; 286 с. [Malyukova L.S., Rogozhina E.V., Strukova D.V. Biological Activity of Agrogenically Modified Soils of the Humid Subtropics of Russia. Sochi. FRC SRC RAS. 2023; 286 p. (In Rus)].
7. Малюкова Л.С., Рогожина Е.В., Струкова Д.В. Диагностика биофункционального состояния агрогенно-изменённых почв под многолетними насаждениями в зоне влажных субтропиков России. Сочи: ФГБУН ФИЦ «Субтропический научный центр Академии наук». 2022; 81 с. [Malyukova L.S., Rogozhina E.V., Strukova D.V. Diagnostics of the biofunctional state of agrogenically modified soils under perennial plantings in the humid subtropics of Russia. Sochi: Subtropical Research Center of the Academy of Sciences. 2022; 81 p. (In Rus)]. ISBN: 978-5-904533-45-8.
8. Малюкова Л.С. Концептуальные положения оптимизации агробиоэкологического статуса почв при многолетнем возделывании культуры чая, Субтропическое и декоративное садоводство. 2024; 90 : 171-188. [Malyukova L.S. Conceptual provisions for optimizing the agrobioecological status of soils during long-term cultivation of tea, Subtropical and ornamental gardening. 2024; 90 : 171-188. (In Rus)]. DOI: 10.31360/2225-3068-2024-90-171-189.
9. Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Мясникова М.А., Акименко Ю.В., Колесников С.И. Влияние технологии прямого посева на почвенную мезофауну, дыхание и ферментативную активность чернозёмов южных, Агрохимический вестник. 2019; 5 : 31-36. [Mokrikov G.V., Kazeev K.Sh., Myasnikova M.A., Akimenko Yu.V., Kolesnikov S.I. Influence of direct seeding technology on soil mesofauna, respiration and enzymatic activity of southern chernozems, Agrochemical Bulletin. 2019; 5 : 31-36. (In Rus)]. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10071.
10. Практикум по агрохимии. Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ. 2001; 687. [Practical training in agrochemistry. Ed. by V.G. Mineev. Moscow: Moscow State Univer-

sity Press. 2001; 687. (In Rus)].
11. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Сочи // Погода и климат URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/37099.htm (ссылка активна на 20.08.2025).
12. Сычёв В.Г., Налиухин А.Н. Изменение климата и углеродная нейтральность: современные вызовы перед аграрной наукой, Плодородие. 2021; 5(122) : 3-7. [Sychev V.G., Naliukhin A.N. Climate change and carbon neutrality: modern challenges facing agricultural science, Plodorodie. 2021; 5(122) : 3-7. (In Rus)]. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.01.
13. Якименко В.Н. Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта, Агрохимия. 2019; 3 : 1929. [Yakimenko V.N. Changes in the potassium and magnesium content in the soil profile of a long-term field experiment, Agrochemistry. 2019; 3 : 1929. (In Rus)]. DOI: 10.1134/S0002188119030153.
14. Ananyeva N.D., Sushko S.V., Ivashchenko K.V., Vasenev V.I. Soil microbial respiration in subtaiga and forest-steppe ecosystems of European Russia: field and laboratory approaches, Eurasian Soil Sci. 2020; 53(10) : 14921501. DOI: 10.1134/S106422932010004X.
15. Ikkonen E.N., Garsía-Calderón N.E., Álvarez-Arteaga G., et al. The CO_2 concentration in soils of montane cloud forests of southern Mexico, Eurasian Soil Science. 2013; 46(2) : 153-157. DOI: 10.1134/S1064229313020063.
16. Koptsik G.N., Kupriianova Y.V., Kadulin M.S. Spatial variability of carbon dioxide emission by soils in the main types of forest ecosystems at the Zvenigorod Biological Station of Moscow State University Moscow University soil science bulletin. 2018; 73 : 81-88. DOI: 10.3103/S0147687418020035.
17. Rogozhina E.V., Zakharikhina L.V. Transformation of Physicochemical Properties and CO_2 Emission from Urban Soils in the Mountainous Landscape of Sochi City, Eurasian Soil Science. 2025; 58(5) : 1-12. DOI: 10.1134/S1064229324603810.
18. SCD4x // Senserion URL: https://sensirion.com/media/documents/48C4B7FB/64C134E7/Sensirion_SCD4x_Datasheet.pdf (ссылка активна на 20.08.2025).
19. Sushko S.V., Ananyeva N.D., Ivashchenko K.V., Vasenev V., Kudeyarov V. Soil CO_2 emission. microbial biomass. and microbial respiration of woody and grassy areas in Moscow (Russia), J. Soils Sediments. 2019; 19 : 3217-3225. DOI: 10.1007/s11368-018-2151-8.
20. Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. DOI: 10.29003/m4174.978-5-317-07235-3.
21. Zakharikhina L.V., Burtovoy A.V. Anthropogenic Evolution of Zheltozems in the Sochi Sanatorium Area, Eurasian Soil Science. 2020; 53 : 820828. DOI: 10.1134/S1064229320060149.
22. Zakharikhina L.V., Malyukova L.S., Ryndin A.V. Genesis and geochemistry of the soils of urban landscapes of the Black Sea coast of Russia, Catena. 2022; 210 : 105881. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105881.

CO_2 EMISSION IN SOILS OF THE HUMID SUBTROPICS OF RUSSIA

Rogozhina Ye.V.

Federal Research Centre
the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Sochi, Russia, e-mail: rogojinaEW@yandex.ru

The physicochemical properties and CO_2 emission of soils of garden agrocenoses of the Lazarevsky (Uch-Dere settlement, 43°41′5″ N 39°38′14″ E) and Khostinsky (43°34′3″ N 39°45′10″ E) districts of the city of Sochi were studied. CO_2 emission measurements from agrogenically modified soils (Anthrosols) were conducted in situ in February, April, June, October 2024 and in March–July 2025 using the closed chamber method and a portable infrared gas analyzer under agrocenoses of peach (*Persica vulgaris* Mill.), mandarin (*Citrus reticulata* Blanco), tea (*Camellia sinensis* L.) Kuntze, and hazelnut (*Corylus maxima* Mill.). The background soils were Cambisols of natural biogeocenoses (forest) and a field experiment variant under tea without fertilizer application, located in areas adjacent to the agrocenoses. The physicochemical properties of Acrisols and CO_2 emission were studied under an orchard of feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret.). All CO_2 emission measurements were accompanied by soil sampling, in which the soils physicochemical parameters were determined. In agrogenically modified Cambisols, an increase in soil solution acidity pH_{KCl} relative to the background was noted (under peach, mandarin, tea and hazelnut by an average of 1.3, 1.0, 1.0 and 0.6 units, respectively); an increase in the concentration of mobile phosphates by an order of magnitude; a decrease in the humus content by an average of 1 %, with the exception of soils under tea, where agrotechnical cultivation practices (fertilizers and plant litter from pruning material) create conditions for an increase in humus reserves by an average of 0.8 % compared to the background. A decrease in moisture by 13–15 % and an increase in temperature by 1.0–1.5 °C were observed in soils under peach and mandarin relative to the background, as well as higher moisture (by 4–9%) in the soils of the tea plantation compared to the natural cenosis. On average, over the study period, the rate of carbon dioxide flux from peach orchard soils was 12 % higher than background levels, due to the presence of sod. Soil CO_2 emissions under mandarin trees averaged 20 % lower than background levels, primarily due to the influence of fertilizers and pesticide loads in the spring. A 21 % decrease in emissions under tea was likely due to the effects of prolonged fertilizer use and the lack of sod.

***Key words**:* soil respiration, Cambisols, Acrisols, agrogenic load, Sochi Black Sea region.