

Современные климатические изменения и их взаимосвязь с эмиссией CO₂ в агроэкосистемах на агросерой почве лесостепи Прибайкалья

Е. Н. ЗВЯГИНЦЕВА, Ю. В. СЕМЕНОВА

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, а/я 317
E-mail: agroeco@sifibr.irk.ru

Статья поступила 11.04.2014

Принята к печати 24.10.2014

АННОТАЦИЯ

В многолетнем (1997–2012 гг.) мониторинге в агроэкосистемах на агросерой почве лесостепи Прибайкалья изучали связь между климатическими факторами и эмиссией CO₂ в атмосферу в отдельные сезоны года. Выявлено, что весной и осенью поток CO₂ сильнее зависел от гидротермических показателей, чем летом. Вклад летнего сезона в поток CO₂ составлял 67 и 72 % соответственно в пару и посевах. На основе 16-летних наблюдений дана среднееголетняя оценка годового потока эмиссии CO₂ в атмосферу, величина которого в пару составляет 173, а в посевах яровой пшеницы – 229 г С/м².

Ключевые слова: эмиссия CO₂ из почв, агроэкосистема, гидротермические показатели, климатические изменения.

Как известно, агроэкосистемы вследствие незамкнутости цикла углерода чаще являются источником поступления CO₂ в атмосферу. Интенсивность дыхания почвы и прямо, и косвенно связана с температурой и влажностью почвы. Влияние каждого из факторов в разные сроки (сутки, месяц, сезон и год) может усиливаться или ослабевать. Определяющей величину годовой эмиссии CO₂ из почв считают сумму осадков за период весна – лето [Курганова, 2010; Чимитдоржиева, 2011]. Величина месячных потоков, а также сезонная и суточная динамика эмиссии из агроэкосистем в основном зависит от температуры почвы и воздуха [Задорожный и

др., 2010; Курганова и др., 2011; Шарков и др., 2013].

Теснота связи между интенсивностью дыхания почв и гидротермическими показателями обусловлена как почвенными, так и климатическими условиями конкретного региона, которые в последние десятилетия существенно изменяются. Согласно докладу РОСГИДРОМЕТ [Оценочный доклад..., 2008], потепление климата в Восточно-Сибирском регионе наиболее выражено. В южных районах сумма биологически активных температур повысилась на 94 °С, а период вегетации увеличился на 3–4 сут. Есть сведения, что потепление происходило в зимний (~2 °С),

весенний и осенний ($\sim 0,9$ °C) сезоны [Виноградова и др., 2002; Густокашина, 2003]. Отмеченные климатические изменения не могут не влиять на формирование суммарного потока CO_2 из почв агроэкосистем.

Цель исследования – оценить сезонные изменения климатических факторов и их взаимосвязь с эмиссией CO_2 из агроэкосистем на агросерой почве лесостепи Прибайкалья.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в агроэкосистемах интенсивного севооборота (однолетний пар, посев яровой пшеницы) на агросерой среднесуглинистой почве (общий углерод 1,13 %, общий азот 0,13 %, $\text{pH}_{\text{вод}}$ 6,6). Многолетний (1997–2012 гг.) мониторинг за эмиссией CO_2 в полевых опытах осуществляли на стационаре “Иркутский”, расположенном в юго-восточной части лесостепной зоны Прибайкалья.

Климат территории умеренно сухой и резко континентальный. Общее количество осадков за год составляет 270–450 мм, из них более 3/4 приходится на теплый период (апрель – октябрь). Лето жаркое и сухое в первой половине, а максимум осадков приходится на июль–август. Средняя температура июля составляет 16–18 °C. Зима суровая, продолжительная и сравнительно малоснежная. Средняя температура января составляет -21 °C [Государственный доклад..., 2008]. Сумма активных температур воздуха – 1400–1600 °C. Устойчивая температура ниже 0 °C держится от 160 до 180 дней в году. Постоянный снежный покров образуется в начале ноября (31 октября – 10 ноября), а его разрушение заканчивается до 10 апреля. Для почв характерна длительная сезонная мерзлота до глубины 1,5–2 м [Атлас..., 2004].

Скорость эмиссии CO_2 за сутки определяли абсорбционным методом в режиме оперативного мониторинга (шаг 7 сут) с апреля по октябрь [Шарков, 1987]. На поверхность почвы помещали чашку диаметром 5 см, содержащую 10 мл 1 н. NaOH, которую сверху накрывали сосудом-изолятором диаметром 10 и высотой 15 см, врезая его на глубину 3–4 см. Через 24 ч экспозиции остаток щелочи оттитровывали 0,2 н. раствором H_2SO_4 . Параллельно осуществляли контрольное опре-

деление. Методика обеспечивает сохранение естественного градиента концентрации CO_2 в системе почва – надпочвенный воздух и, следовательно, скорости его диффузии. Повторность определения для каждого варианта трехкратная. Поток CO_2 за месяц рассчитывали на основе еженедельных измерений методом линейной интерполяции. Сезонный и годовой потоки оценивали как сумму месячных значений. Одновременно с измерением скорости эмиссии CO_2 термостатно-весовым методом определяли влажность почвы (W , %).

Анализ многолетних (1961–2012 гг.) гидро-термических показателей теплого периода года (среднесуточная температура воздуха, $T_{\text{ср}}$; сумма биологически активной температуры воздуха > 10 °C, T_a ; сумма осадков, P) проводили на основе данных, полученных на метеостанции г. Иркутска [ВНИИГМИ; <http://www.meteo.ru>]. Выявленные в течение мониторинга (1997–2012 гг.) климатические условия сравнивали с “климатической нормой”, соответственно требованиям Всемирной метеорологической организации (ВМО), которая для каждого показателя рассчитывалась как среднее многолетнее значение за 30-летний период (1961–1990 гг.). Изменения оценивали как значимые, если отклонение показателя от нормы составляло $\pm 1 \sigma$ (стандартное отклонение).

Для обработки результатов использовали методы описательной статистики. Тенденцию изменения гидротермических показателей и величины потока CO_2 из почвы выявляли путем построения линейных трендов. Направленность и степень синхронности варьирования признаков оценивали с помощью коэффициента линейной корреляции (r). Для определения причинно-следственной зависимости эмиссии CO_2 от климатических условий, формировавшихся в течение теплого периода года рассчитывали корреляционное отношение (η^2). Сравнительный анализ позволил оценить тесноту связи между климатическими факторами и величиной потока CO_2 из почвы за теплый период года (весна, лето, осень).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетние (1997–2012 гг.) изменения суммы биологически активной температуры воздуха (T_a), характеризующей тепловой ре-

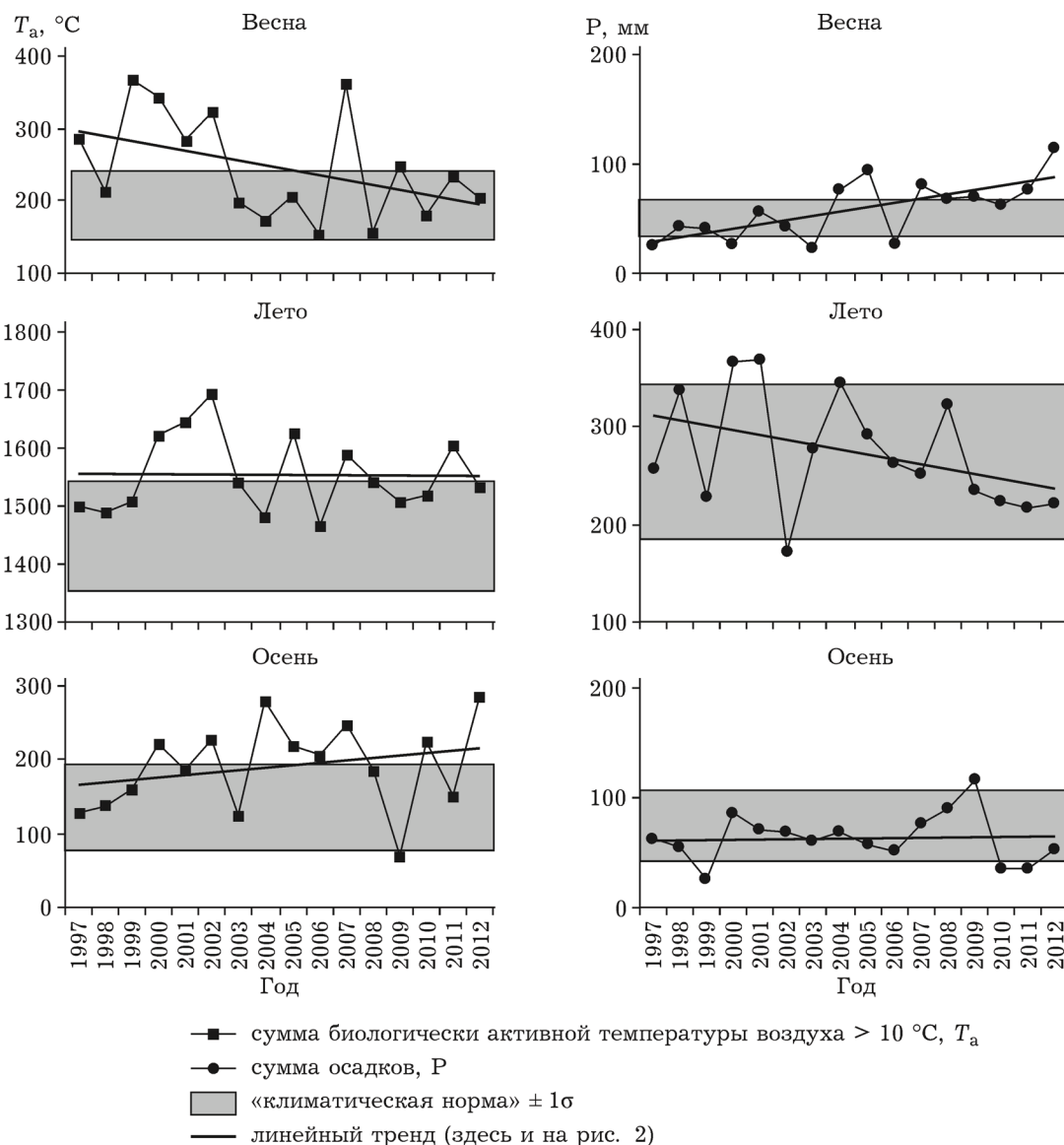


Рис. 1. Многолетняя динамика суммы биологически активной температуры воздуха (T_a , °С) и осадков (P , мм) за теплый период года (апрель – октябрь)

сурс климата, и суммы осадков (P) в разные сезоны года представлены на рис. 1. Так, в начале наблюдений весной (апрель–май) температура значительно превышала «климатическую норму». Отмечалась выраженная тенденция ее снижения ($R^2 = 0,20$). Сумма осадков, напротив, увеличивалась ($R^2 = 0,49$). Лето (июнь – август) характеризовалось высокой T_a , которая существенно не изменялась. В то же время количество осадков снижалось ($R^2 = 0,16$), варьируя в пределах нормы. Осенью (сентябрь – октябрь) выявлена только тенденция повышения температуры воздуха. Межгодовая вариабельность, харак-

теризующая степень изменчивости показателей T_a и P , в среднем за мониторинг весной (29 и 45 %) и осенью (30 и 35 %) была выше, чем летом (4 и 21 % соответственно). Данные демонстрируют, что за 16 лет наблюдений изменения климатических условий оказались наиболее выраженными весной и осенью. Можно предположить, что в годы исследований весна становилась более холодной и влажной, а осень теплее.

Многолетняя динамика суммарной эмиссии CO_2 из агросерой почвы откликнулась на сезонные изменения климатических показателей (рис. 2). Так, весной в отдельные годы в

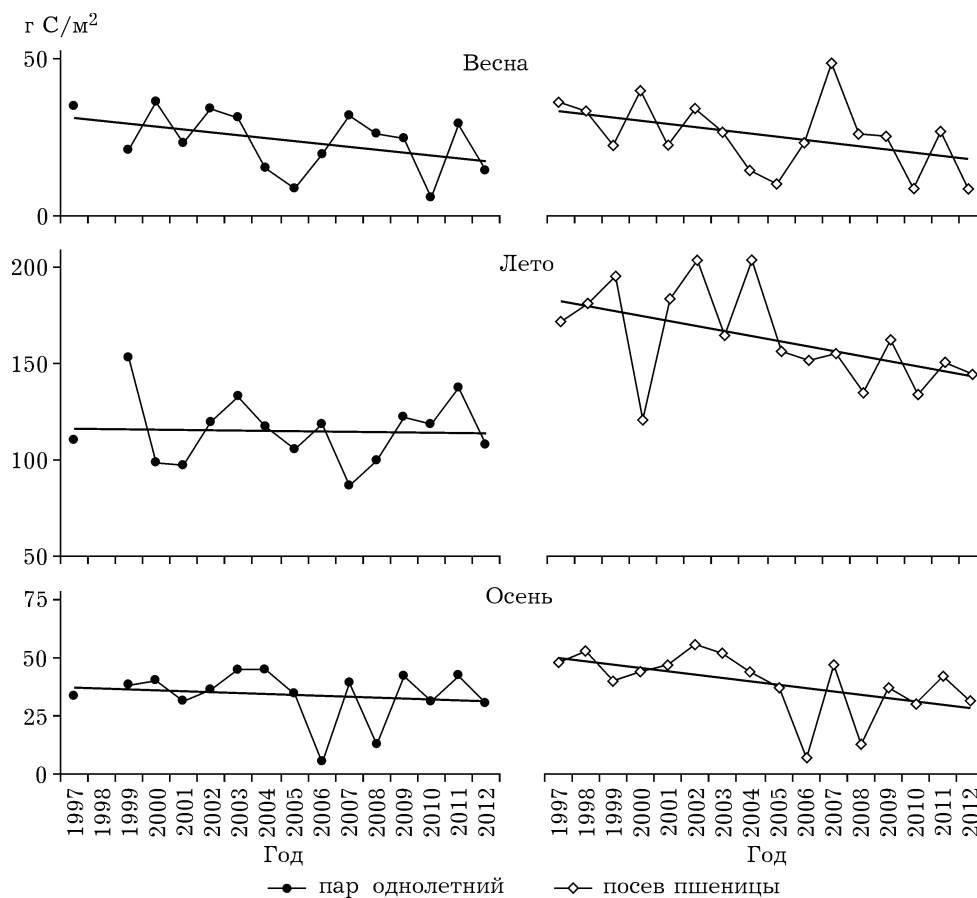


Рис. 2. Динамика суммарной эмиссии CO_2 в отдельные сезоны

пару и в посеве она колебалась в пределах 8–37 и 8–49 г С/м^2 соответственно. Отмечался тренд снижения суммарной эмиссии CO_2 ($R^2 = 0,19$). Летом в пару ее поток достигал 86–152 г С/м^2 , причем направленность изменений не проявлялась. В посеве показатель значительно увеличивался (121–204 г С/м^2), вследствие корневого дыхания, причем прослеживалась тенденция его снижения ($R^2 = 0,24$). Осенью и в пару, и посеве изменение потока CO_2 оказалось аналогичным, однако его значения не превышали 5–45 и 7–55 г С/м^2 соответственно. Межгодовая вариабельность суммарного потока CO_2 из почв летом оказалась меньше (15 %), чем весной и осенью (≥ 40 и 33 %), что могло быть связано с изменением суммы активных температур и осадков.

Зависимость эмиссии CO_2 из почв от гидротермических показателей в отдельные сезоны различалась. Весной между потоком CO_2 и суммой активных температур воздуха ($r =$

$= 0,57$ и $0,62$ соответственно в пару и посе- ве), как и суммой осадков ($r = -0,54$ и $-0,47$), линейные связи оказались наиболее тесными. Летом в пару только между эмиссией CO_2 и суммой осадков была связь средней степени. Осенью зависимость между показателями оказалась слабо выраженной. Известно, что низкий коэффициент корреляции может означать как отсутствие связи, так и достаточно высокую причинно-следственную зависимость. Так, корреляционное отношение между скоростью эмиссии CO_2 (г/м^2 сут) и среднесуточной температурой воздуха ($T_{\text{ср}}$, $^{\circ}\text{C}$), а также с влажностью почвы (W , %), как и коэффициент детерминации свидетельствуют, что весной в пару она зависела от $T_{\text{ср}}$ на 54 %, а от W – на 75 % (табл. 1). Летом влияния гидротермических условий не выявлено, тогда как осенью их роль возрастала. Следовательно, в весенние и осенние месяцы зависимость эмиссии CO_2 от гидротермических показателей являлась максималь-

Связь между скоростью эмиссии CO₂ из почвы и гидротермическими показателями за теплый период года

Сезон	Среднесуточная температура воздуха			Влажность почвы		
	<i>r</i>	η	η^2	<i>r</i>	η	η^2
			Пар			
Весна	0,66*	0,73*	0,54*	-0,83*	0,86*	0,75*
Лето	0,31*	0,09	0,01	-0,10	0,04	0,00
Осень	0,24	0,50*	0,25*	-0,32*	0,49*	0,24*
			Посев яровой пшеницы			
Весна	0,58*	0,65*	0,42*	-0,67*	0,73*	0,54*
Лето	0,29*	0,12	0,01	-0,14	0,11	0,01
Осень	0,26	0,46*	0,21*	-0,67*	0,57*	0,32*

* Значимые связи между показателями при $\alpha = 1\%$ ($n \geq 71$).

ной. Это согласуется с выводами других авторов [Курганова и др., 2002; Малханова и др., 2008].

Можно предположить, что в исследуемые годы снижение эмиссии CO₂ из почв агроэкосистем весной связано с увеличением осадков на фоне запаса влаги, накопленного за предшествующий холодный период. Подавление интенсивности эмиссии CO₂ при избыточном увлажнении почв известно [Heikkinen et al., 2004]. Отсутствие связей между показателями летом, по-видимому, обусловлено многообразием и сочетанием факторов, способных как нивелировать друг друга, так и проявляться опосредованно. Так, постепенное повышение температуры воздуха до середины лета и последующее снижение приводят сначала к усилению дыхания почвы, а затем к его подавлению. Существенные коррективы в поток CO₂ вносят как температурная адаптация дыхания корней, так изменения в структуре микробного сообщества [Atkin et al., 2000; Eliasson et al., 2005; Knorr et al., 2005]. От изменения влажности почвы существенно зависит доступность углеродного субстра-

та для микроорганизмов вследствие разрушения почвенных агрегатов, а также частичной гибели микроорганизмов [Ларионова, 2010; Степанов, 2011]. Осенью наличие слабых линейных связей между эмиссией CO₂ и температурой воздуха обусловлено, вероятно, периодичностью процессов промерзания и оттаивания почвы [Каганов, Курганова, 2011].

Интерес также представляют изменения гидротермических условий в разные сезоны года и их связь с ежегодным вкладом в общий поток эмиссии CO₂ в агроэкосистемах на агросерых почвах (табл. 2). В зависимости от условий в отдельные годы доля эмиссии CO₂ весной и осенью варьировала от 4 до 25 %, а летом повышалась (55–83 %). Средний за мониторинг вклад за весенний сезон в пару и посеве соответственно составлял 14 и 11 % от общего годового потока эмиссии CO₂, за осенний – 19 и 17, а за летний – 67 и 72 %. Результаты свидетельствуют, что формирование годового потока эмиссии CO₂ зависело от климатических условий в разные сезоны. Вклад в годовой поток CO₂ весной и

Вклад отдельных сезонов в годовой поток CO₂ из почв, %

Сезон	Пар			Посев		
	среднее	пределы колебаний	<i>V</i> , %	среднее	пределы колебаний	<i>V</i> , %
Весна	14	5–21	37	11	4–19	43
Лето	67	55–83	11	72	59–83	9
Осень	19	4–25	30	17	4–21	28

осенью оказался меньше, чем летом. Учитывая низкую межгодовую вариабельность вклада летнего сезона ($V \sim 10\%$), его показатели можно использовать для оценки годового потока CO_2 . Так, если весной в пару и посеве эмиссия CO_2 составляла соответственно 24 ± 2 и 25 ± 3 г $\text{C}/\text{м}^2$, то летом превышала это значение в 5 раз, тогда как осенью почвенное дыхание снижалось (34 ± 4 и 40 ± 3 г $\text{C}/\text{м}^2$). В среднем за 16 лет мониторинга годовой поток CO_2 в пару составлял 172 ± 7 ($V = 11\%$), а посеве – 228 ± 10 г $\text{C}/\text{м}^2/\text{год}$ ($V = 14\%$).

Сопоставление данных с имеющимися в литературе для агроценозов на серых лесных почвах лесостепной зоны подтверждает связь формирования потока CO_2 с климатическими условиями отдельных регионов России. С этой целью результаты переведены в кг $\text{CO}_2/\text{га}/\text{ч}$ с учетом периода измерений. В наших экспериментах средняя скорость дыхания почвы в посеве за вегетационный сезон (май – август), когда выделяется основной объем CO_2 , составляла около 2 кг $\text{CO}_2/\text{га}/\text{ч}$. Это соответствует показателям, полученным в многолетних исследованиях, проводимых в северо-западной части Прибайкалья (2–5 кг $\text{CO}_2/\text{га}/\text{ч}$) [Помазкина и др., 1999]. В условиях Красноярского края за этот же период скорость эмиссии достигала порядка 4 кг $\text{CO}_2/\text{га}/\text{ч}$ [Кураченко и др., 2002]. Примерно такой же поток зафиксирован и для центрально-лесостепного района Западной Сибири, однако это значение получено с июня по ноябрь, что внесло определенные коррективы [Шарков, 1987]. На территории Южного Подмосковья за летние месяцы в среднем выделялось около 3 кг $\text{CO}_2/\text{га}/\text{ч}$ [Курганова, 2010]. При этом все перечисленные регионы располагаются в разных областях умеренного пояса. Так, Прибайкалье относится к области резко континентального климата, Красноярская и Западно-Сибирская лесостепь представляют континентальную область, а Подмосковье – умеренно континентальную. Это дает основание считать, что климатические условия и географическое положение региона влияют на величину потока CO_2 из почв наряду с множеством биологических, биохимических, почвенно-физических и геологических факторов [Наумов, 2009].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние мониторинговые исследования в агроэкосистемах на агросерой почве лесостепи Прибайкалья показали, что современные климатические изменения наиболее выражены в весенний и осенний сезоны. Для весны характерны тренды снижения суммы активных температур воздуха и увеличение количества осадков, тогда как для осени только рост температуры. Тенденция снижения эмиссии CO_2 как в пару, так и в посеве указывает на зависимость от гидротермических условий. Плотность корреляционных связей между эмиссией CO_2 и гидротермическими показателями уменьшалась в ряду: весна > > осень > лето. Вклад летнего сезона в поток CO_2 составляет 67 и 72 % соответственно в пару и посеве. Для региона на основе 16-летнего мониторинга дана репрезентативная оценка годового потока CO_2 , который в пару составлял 172 ± 7 , а в посеве яровой пшеницы – 228 ± 10 г $\text{C}/\text{м}^2$.

Авторы выражают благодарность д-ру биол. наук, проф. Л. В. Помазкиной за постановку исследования и ценные консультации по обобщению материалов, а также всем сотрудникам лаборатории агроэкологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 03-04-49450, 05-04-97206 р_Байкал_a, 08-04-98042 р_Сибирь_a, 12-04-98054 р_Сибирь_a, 14-45-04040 р_Сибирь_a и Интеграционного междисциплинарного проекта СО РАН № 17.

ЛИТЕРАТУРА

- Атлас. Иркутская область: экологические условия развития. М.; Иркутск, 2004. 90 с.
- Виноградова Г. М., Завалишин Н. Н., Кузин В. И. Внутренние изменения климата Восточной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15, № 5–6. С. 408–411.
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации. Мировой центр данных. <http://www.meteo.ru>
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 2007 г. Иркутск, 2008. 359 с.
- Густокашина Н. Н. Многолетние изменения основных элементов климата на территории Предбайкалья. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003. 107 с.
- Задорожный А. Н., Семенов М. В., Ходжаева А. К., Семенов В. М. Почвенные процессы продукции, потреб-

- ления и эмиссии парниковых газов // *Агрохимия*. 2010. № 10. С. 75–92.
- Каганов В. В., Курганова И. Н. Оценка скорости минерализации органического вещества основных типов почв Европейской части России при различных температурных режимах // *Науч. ведомости БелГУ. Сер.: Естественные науки*. 2011. № 15.
- Кураченко Н. Л., Белоусов А. А., Чупрова В. В. Сезонная эмиссия углекислого газа из почв южнотаежной и лесостепной зон Красноярского края // *Геоэкологические проблемы почвоведения и оценки земель: мат-лы Междунар. науч. конф. / под ред. Л. И. Герасько*. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2002. Т. 1. С. 165–168.
- Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Розанова Л. Н., Сапронов Д. В., Мякшина Т. Н., Кудеяров В. Н. Оценка эмиссии диоксида углерода из пахотных серых лесных почв // *Агрохимия*. 2002. № 9. С. 52–57.
- Курганова И. Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2010. 50 с.
- Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Мякшина Т. Н., Сапронов Д. В., Кудеяров В. Н. Эмиссия CO₂ из почв различных экосистем южно-таежной зоны: анализ данных непрерывных 12-летних круглогодичных наблюдений // *Докл. РАН*. 2011. Т. 436, № 6. С. 843–846.
- Ларионова А. А., Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Золотарева Б. Н., Евдокимов И. В., Кудеяров В. Н. Эмиссия диоксида углерода из агросерых почв при изменении климата // *Почвоведение*. 2010. № 2. С. 186–195.
- Малханова Е. В., Егорова Р. А., Чимитдоржиева Г. Д. Сезонная динамика эмиссии CO₂ мерзлотными почвами Забайкалья // *Агрохимия*. 2008. № 2. С. 66–69.
- Наумов А. В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
- Оценочный доклад об изменении климата и их последствия на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2008. 28 с.
- Помазкина Л. В., Котова Л. Г., Лубнина Е. В. Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем на техногенно загрязняемых почвах. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1999. 208 с.
- Степанов А. Л. Микробная трансформация парниковых газов в почвах. М.: ГЕОС, 2011. 192 с.
- Чимитдоржиева Э. О. Запасы углерода в черноземах и каштановых почвах Западного Забайкалья и эмиссия CO₂: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2011. 20 с.
- Шарков И. Н. Совершенствование абсорбционного метода определения выделения CO₂ из почвы в полевых условиях // *Почвоведение*. 1987. № 1. С. 127–133.
- Шарков И. Н., Шелепов А. Г., Мишина П. В. Продуцирование CO₂ пашней на черноземе выщелоченном в условиях центральной лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия*. 2013. № 5. С. 51–57.
- Atkin O. K., Edwards E. J., Loveys B. R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming // *Nev Phytol*. 2000. Vol. 147, N 1. P. 141–154.
- Eliasson P. E., McMurtrie R. E., Pepper D. A., Strömgren M., Linder S., Ågren G. I. The response of heterotrophic CO₂ flux to soil warming // *Global Change Biol*. 2005. Vol. 11, N 1. P. 167–181.
- Heikkinen J. E. P., Virtanen T., Huttunen J. T., Elsakov V., Martikainen P. J. Carbon balance in East European tundra // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. P. GB1023.
- Knorr W., Prentice I. C., House J. I., Holland E. A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming // *Nature*. 2005. Vol. 433, N 7023. P. 298–301.

Climate Changes and their Connection with CO₂ Emission in Agroecosystems on Agrogrey Soil of the Baikal Forest-Steppe

E. N. ZVYAGINTSEVA, Yu. V. SEMENOVA

*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS
664033, Irkutsk, Lermontova str., 132
E-mail: agroeco@sifibr.irk.ru*

Long-term (1997–2012) monitoring of agroecosystems on the agrogrey soil of the Baikal forest-steppe was carried out. The influence of climatic factors on CO₂ emission to the atmosphere in different seasons of the year was studied. There was a close correlation between the CO₂ flux and hydrothermal indicators in spring and autumn. The contribution of the summer season to the annual flux of CO₂ made up 67 and 72 % in the fallow and wheat crop respectively. On the basis of 16-year observations the average annual CO₂ emission was calculated: it amounted to 173 g C/m⁻² in the fallow and 229 g C/m⁻² in the wheat crop.

Key words: CO₂ emission from soils, agroecosystem, hydrothermal indicators, climatic changes.