

ОЦЕНКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОЧВЕННОГО МИКРОБНОГО КОМПЛЕКСА И СОСТОЯНИЯ АГРОЭКОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Л.В. Помазкина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, lvp@sifibr.irk.ru

Аннотация. В агроэкосистемах Байкальского региона на загрязненных тяжелыми металлами аллювиальных почвах ежегодно (1992-2005 гг.) изучали влияние климатических факторов на содержание С мик и эмиссию CO₂ из почв. Выявлена зависимость эмиссии CO₂ от температуры воздуха, особенно в аномальные годы. Изменения экофизиологических показателей (С мик/С орг, % и С-CO₂/С мик, мг/г ч) и трансформации углерода в разных по содержанию гумуса почвах показали неодинаковую устойчивость их микробного комплекса. Анализ результатов на основе методологии сравнительного и системного анализа выявил зависящие от изменения факторов среды режимы функционирования агроэкосистем.

Ключевые слова: *загрязнение почв, микробная трансформация углерода, функционирование агроэкосистем*

DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-1111-1115

Решение экологических проблем требует новых парадигм, особенно в развитии агроэкологии, заслуживающей внимания в условиях современных изменений окружающей среды. Однако, фундаментальные концепции в изучении агроэкосистем, функционирование которых зависит от природных и антропогенных факторов, используются недостаточно. Экспериментально мало изучено, способна ли агроэкосистема поддерживать свойственные ей структуру, функции, сохранение вещества, энергии и информации, а также какова их роль в формировании устойчивости, позволяющей снижать экологическую нагрузку благодаря природным механизмам саморегуляции. Интерес представляют связанные с гомеостатическим механизмом регуляции параметры, обеспечивающие формирование замкнутости биогеохимического цикла углерода и характеризующие неспецифический отклик на изменение факторов среды. Подходы, позволяющие оценивать режим функционирования и экологическую нагрузку на агроэкосистему с учетом свойств почв и природно-климатических условий, практически не разработаны.

В СИФИБР СО РАН в длительных (1992-2018 гг.) агроэкологических мониторингах, единственных в условиях Сибири, изучается воздействие современных климатических изменений на состояние и функционирование агроэкосистем на разных почвах лесостепи Байкальского региона, включая техногенно загрязненные тяжелыми металлами и фторидами алюминиевого производства. Агроэкосистема исследуется как объект взаимодействующих компонентов (почва-микроорганизмы-растения-атмосфера), образующих целостную открытую систему, функционирование которой зависит от природных и антропогенных воздействий. Ежегодные за вегетацию изменения климата рассматриваются относительно «климатической нормы» [WMO, 2008]. Особое внимание уделяется формированию цикла углерода и оценке функционирования агроэкосистем в изменяющихся условиях среды, что возможно только в длительном мониторинге [Pomazkina, 2011; Помазкина, 2015].

Методы исследования. В полевых опытах на разных типах почв, включая техногенно загрязненные, еженедельно в течение вегетации определяется среднесуточная скорость эмиссии CO₂ из почв [Шарков, 1987]. Одновременно методом

регидратации [Благодатский и др., 1987] анализируется содержание углерода микробной биомассы (С мик) в почве. Повторность измерений 4-х кратная. Показатели используются для расчета средних за месяц и вегетацию данных. Динамические изменения показателя $C-CO_2 / C \text{ мик}$ (мг С /г в час) характеризуют затраты углерода на дыхание единицы микробной биомассы, или удельную дыхательную активность (УДА) почвенного микробного комплекса [Помазкина, 2015]. Величина микробной биомассы, относительно содержания общего углерода в пахотном слое почвы (С мик/С орг, %), рассматривается как формирование в почве активного пула новообразованных углеродсодержащих веществ, или показатель доступного субстрата.

На экосистемном уровне реакция микробного комплекса на изменение факторов среды оценивается по трансформации углерода в почве, которая связана с активностью процессов минерализации и микробного синтеза углеродсодержащих веществ. Анализ и обобщение ежегодных данных трансформации углерода в агроэкосистемах проводили, используя методологию сравнительного и системного анализа [Pomazkina, 2011; Помазкина, 2015]. Агроэкосистему исследовали как открытую систему компонентов (почва-микроорганизмы-растения-атмосфера), интегрированных потоками углерода. Минерализовавшийся (М) за вегетацию углерод рассматривали как «вход» в систему, формирующий поток нетто-минерализованного (Н-М) углерода – «выход» и поток (ре)иммобилизованного (РИ) углерода – «возврат на выходе», или обратная связь, обеспечивающая формирование новообразованных веществ, как субстрата для микробного комплекса. Подход, основанный на количественной оценке потоков внутрипочвенного цикла углерода и соотношения их (Н-М:РИ), позволяет интегрально оценить режим функционирования агроэкосистемы и нагрузку, зависящую от воздействия климатических и антропогенных факторов, включая техногенное загрязнение почв. Средние за вегетацию потоки Н-М и РИ углерода рассчитывали с учетом плотности сложения пахотного слоя почв (г С /м²). Режим функционирования и экологическую нагрузку на агроэкосистему оценивали по разработанной шкале критериев, согласно которой показатель Н-М:РИ близкий к единице характеризует динамически-равновесное состояние агроэкосистемы (режим гомеостаза). Повышение экологической нагрузки меняет режим функционирования: стресс, резистентность, адаптационное истощение, репрессия. Их изменение показывает и уровень воздействия на агроэкосистему. Обобщение данных на основе методологии системного анализа, включая оценку обратной связи, позволяет развитие агроэкосистем рассматривать в аспекте самоорганизации.

Таблица.

Критерии режима функционирования и нагрузки на агроэкосистему

Режим функционирования	Уровень воздействия (нагрузка)	РИ:М, %	Н-М:РИ
Гомеостаз	Норма	50-45	0.8-1.2
Стресс	Допустимый	45-35	1.2-2.0
Резистентность	Предельно допустимый	35-25	2.0-3.0
Адаптационное истощение	Критический	25-15	3.0-5.0
Репрессия	Недопустимый	<10-15	>5.0

Как пример, в мониторинге (1992–2005 гг.) рассмотрим результаты полевых опытов (пар и посев яровой пшеницы) на разных по свойствам аллювиальных почвах, одинаково загрязненных тяжелыми металлами (ТМ). На фоне климатических изменений в разные годы, связанных в основном с повышением температуры воздуха, выявлены особенности трансформации углерода в агроэкосистемах. Статистическая оценка воздействия факторов среды на отдельные компоненты агроэкосистем

свидетельствует о нелинейных, многофакторных взаимосвязях. Функционирование агроэкосистем зависело как от содержания ТМ в почве, так и от влияния на другие компоненты. Полученные экспериментальные доказательства служат основанием для оценки воздействий факторов среды на внутрисистемные взаимодействия компонентов, от которых зависят режимы функционирования агроэкосистем. Ежегодные изменения трансформации углерода показали, что среднее за мониторинг содержание С мик на почве G ниже, особенно в аномальные годы, а скорость эмиссии CO₂ выше. Выявлено, что на обеих почвах содержание С мик больше зависело от влажности почвы, а эмиссия CO₂ от температуры воздуха. Как известно, прямая зависимость между повышением температуры и эмиссией CO₂ из почв представляет интерес для современных изменений климата и оценки биосферной роли агроэкосистем. Впервые для региона рассчитаны средние за мониторинг показатели эмиссии C-CO₂ за вегетацию. На отличавшейся высоким содержанием гумуса аллювиальной почве R эмиссия больше (141 г C/м²), чем на почве G (101 г C/м²). Статистически достоверная связь повышения температуры воздуха и эмиссии CO₂ в атмосферу позволяет техногенное загрязнение почв ТМ рассматривать как негативный фактор [Помазкина, Семенова, 2018].

Особенности функционирования почвенного микробного комплекса в разные годы демонстрируют и экофизиологические показатели. Отклик микробной биомассы на факторы среды проявлялся в изменении показателя С мик/С орг, %, как индикатора доступности субстрата, и показателя УДА (C-CO₂/С мик, мг/г ч), характеризующего затраты углерода на дыхание микробной биомассы. Усиление дыхания при снижении содержания С мик на слабогумифицированной почве G характеризует низкую активность микробного сообщества, особенно в аномальные годы. Вероятно, повышение затрат углерода на дыхание микроорганизмов, обусловленное необходимостью адаптации в экстремальных условиях, направлено на выживание, а не на рост С мик, который был лимитирован доступностью субстрата в отличие от сильногумифицированной почвы R. Различия в соотношении затрат углерода на дыхание и рост характеризуют устойчивость почвенного микробного сообщества (чем меньше показатель, тем выше устойчивость). Зависящие от неблагоприятных факторов среды структурные и функциональные перестройки микробного сообщества в разных почвах связаны с формированием метаболизма, обеспечивающего выживание в конкретных почвенно-климатических условиях [Помазкина, Семенова, 2018].

На экосистемном уровне ответ микробного комплекса на изменение факторов среды проявлялся в трансформации углерода, связанной с процессами его минерализации и синтеза в почве и агроэкосистеме. Количественные (г C/м²) показатели минерализовавшегося (М) за вегетацию углерода, а также потоков нетто-минерализованного и (ре)иммобилизованного углерода, как и их соотношение (Н-М:РИ), были использованы для интегральной оценки режимов функционирования агроэкосистем. На загрязненных ТМ аллювиальных почвах большая часть М углерода (C-CO₂, % от М) подвергалась Н-М. Повышение среднего за годы мониторинга показателя сопровождалось снижением РИ углерода, зависящей как от содержания С мик, так и от ее рециркуляции (ресинтез, или «возврат на выходе») неодинаковой на разных почвах, особенно в неблагоприятные годы. Активность (ре)иммобилизации повышала формирование активного пула углерода в почве, который обеспечивает субстрат для микробного комплекса и соответствующую интенсивность трансформации углерода в агроэкосистеме. Результаты демонстрируют роль почвенного микробного сообщества в функционировании агроэкосистем.

Согласно шкале критериев (таблица и рисунок), в близком к норме 1997 г. на слабогумифицированной почве G, например, в пару агроэкосистема функционировала

в режиме стресса (допустимая нагрузка), тогда как на сильногумифицированной почве R – гомеостаза. В аномальные 2002 и 2004 гг. режим резко менялся, особенно на почве G (репрессия; недопустимая нагрузка). Несмотря на отличия показателей в пару и в посеве, большая часть минерализовавшегося углерода подвергалась Н-М. Повышение эмиссии С-СО₂ при снижении РИ обусловлены недостатком доступного субстрата. Отсюда следует, на экосистемном уровне негативное воздействие среды влияет на формирование режима функционирования агроэкосистем, что указывает на низкую устойчивость на почве G. В аномальные 2002 и 2004 гг. негативное воздействие на агроэкосистемы существенно усиливалось, однако на почве R меньше.

Следовательно, устойчивость почвенного микробного сообщества и влияние его на функционирование и развитие агроэкосистем существенно зависят от (ре)иммобилизации углерода, сглаживающей негативные воздействия среды и деградацию органического вещества почв. Разработанный не имеющий аналога подход, интегрально оценивающий режим функционирования и нагрузку факторов среды на агроэкосистемы, может быть использован в экологических исследованиях.

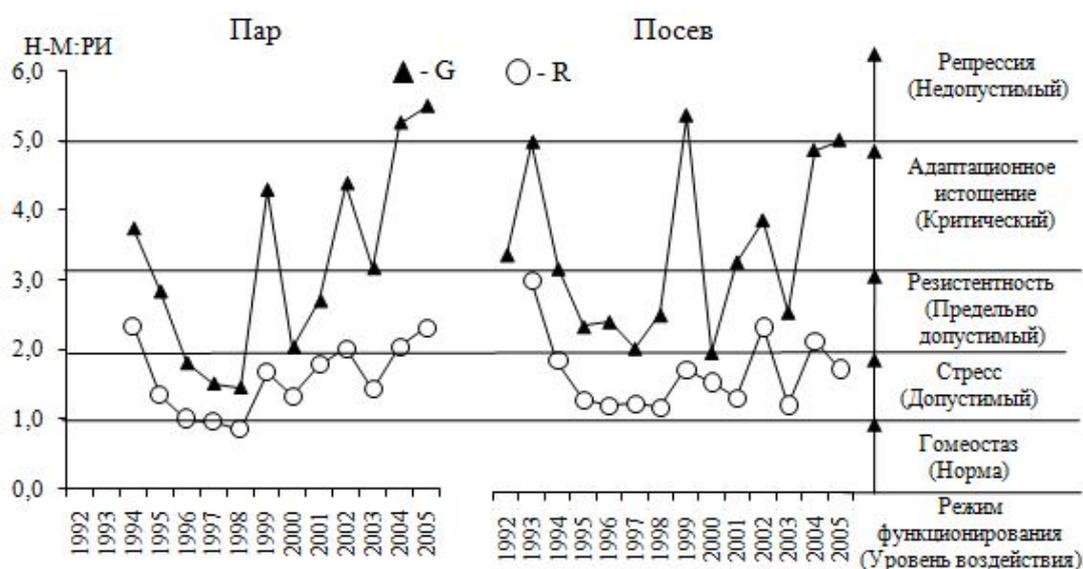


Рисунок. Режимы функционирования агроэкосистем.

Литература

Благодатский С.А., Благодатская Е.В., Горбенко А.Ю., Паников Н.С. Регидратационный метод определения микробной биомассы в почве // Почвоведение. – 1987. – № 4. – С. 64–71.

Помазкина Л.В. Мониторинг эмиссии СО₂ и содержание микробной биомассы в агроэкосистемах на серой лесной почве Прибайкалья в условиях загрязнения фторидами // Почвоведение. – 2015. – № 8. – С. 1–15.

Помазкина Л.В., Семенова Ю.В. Воздействие климатических изменений и загрязнения тяжелыми металлами разных типов почв на трансформацию соединений углерода в агроэкосистемах лесостепи Прибайкалья // Почвоведение. – 2018. – № 5. – С. 618–629.

Шарков И.Н. Совершенствование абсорбционного метода определения выделения СО₂ из почвы в полевых условиях // Почвоведение. – 1987. – № 1. – С. 127–133.

Pomazkina L.V. Integrated assessment of the effect of technogenic pollution and climatic factors on agroecosystems of baikal natural territory // Biology Bulletin Reviews. – 2011. – V.1, No. 4. – P. 358–365.

WMO. Greenhouse Gas Bulletin. – 2008. – No. 4. – 4 p.

EVALUATION OF THE FUNCTIONING OF THE SOIL MICROBIAL COMPLEX AND STATE OF AGROECOSYSTEMS UNDER CONDITIONS OF CLIMATE CHANGES AND TECHNOGENIC POLLUTION

L.V. Pomazkina

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia,
lvp@sifibr.irk.ru

Abstract. The influence of climatic factors on the content of C mic and CO₂ emission from soils was studied annually on heavy metals contaminated soils (1992-2005) in the agroecosystems. The dependence of CO₂ emission on air temperature, the closest in anomalous years, has been proved. Conjugated changes in the indices C mic/C org, % and C-CO₂/C mic, mg / g h revealed the differences in the stability of the microbial community in soils with different content and composition of humus. The generalization of carbon transformation data on the basis of the system analysis methodology determined the formation of regimes of functioning and the state of agroecosystems, which depends on environmental factors.

Keywords: *soil pollution, microbial transformation of carbon, functioning of agroecosystems*