

# КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И АЗОТА С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ПРОЦЕССА

**В.А. Шевченко, ак. РАН, М.Н. Лытов, к.с.-х.н.,  
Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова  
127550, Москва, ул. Б. Академическая, 44**

Целью исследования являлась разработка концептуальной модели биогеохимического цикла органического углерода и азота с интегрированными регуляторами процесса. В основу исследования положены современные представления о формировании малого биогеохимического цикла органического углерода и азота. Модель ориентирована на агроэкосистемы, которые, помимо природных процессов, предполагают антропогенное воздействие и возможность осуществления регуляторных функций. Получены экспериментальные оценки регуляторного потенциала зернобобовой сои и озимой пшеницы, которые подтверждают, что с пожнивно-корневыми остатками в почву поступает не более 0,83 т/га органического углерода. Однако, этот уровень может быть увеличен в 2,3-2,4 раза за счет использования надземной биомассы сои и в 5,6 раза при использовании надземной биомассы озимой пшеницы. Модель позволяет организовать эффективную работу регуляторов на разных уровнях биогеохимического цикла.

**Ключевые слова:** биогеохимический цикл, органический углерод, азот, модель, регуляторы процесса.

Для цитирования: Шевченко В.А., Лытов М.Н. Концептуальное моделирование биогеохимического цикла органического углерода и азота с интегрированными регуляторами процесса // Плодородие. – 2024. – №5. – С. 75-80.

DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.16.

Органическое вещество является основным компонентом, который отличает почву от минерального грунта. Это важнейшая составляющая плодородия почвы, его основа и критерий оценки. Органическое вещество во всех его формах делает почву «живой», и само по себе является необходимым и неотъемлемым звеном обмена веществ и энергии между живой и неживой природой [1, 4, 7].

Основными элементами, определяющими процессы непрерывной трансформации органического вещества в почве, его новообразование и разложение, закрепление, миграцию являются органический углерод и азот. Это биогены, отличающиеся особой подвижностью и динамикой, потоки которых формируются при непосредственном участии биоты в рамках биогеохимических циклов. Устойчивость этих циклов – необходимое условие сохранения плодородия почвы [5, 11, 16, 17]. Особенно остро стоит проблема сохранения и расширения воспроизводства плодородия почвы в отношении орошаемых земель аридных природно-климатических районов [2, 5, 15]. Гидротехнические мелиорации являются мощным фактором, существенно трансформирующим условия почвообразования, динамику и круговорот биогенных элементов. Компенсация природного дефицита влаги потенциально создает условия для расширенного воспроизводства почвенного плодородия, однако на практике часто преобладают противоположные процессы. Усиление одних компонентов биогеохимического цикла и ослабление других качественно меняют направленность процессов почвообразования. Поэтому вместе с гидромелиорациями необходимо предусматривать регуляторные мероприятия, которые бы позволили оптимизировать потоки биогенов в новых условиях [5, 6, 9, 15].

**Цель исследований** – разработать концептуальную модель биогеохимического цикла органического углерода и азота с интегрированными регуляторами процесса для системного решения задачи оптимального управления потоками биогенов на мелиорированных землях.

**Методика.** Целью такого управления является создание условий для расширенного воспроизводства плодородия почвы и повышения биопродуктивности

агроценозов на мелиорированных землях. Системный подход предполагает рассмотрение всей совокупности процессов биогеохимических циклов и оценку возможности их регулирования на разных уровнях при помощи практически реализуемых технологий. В основу исследования положены современные представления о формировании малого (биотического) биогеохимического цикла органического углерода и азота, о составляющих его процессах и временно закрепляемых пулах, а также о возможности регулирования потоков за счет применения тех или иных технологий [9, 11, 12, 14, 17].

Особенностью исследований является позиционирование таких технологий в качестве регуляторов потоков, которые могут быть встроены в известные модели биогеохимического цикла рассматриваемых биогенных элементов. Этот подход позволяет построить систему из целого ряда регуляторов и настроить их использование таким образом, чтобы комплексная задача регулирования потоков биогенных элементов решалась максимально эффективно. Возможность «настройки» совместного использования различных технологий для регулирования потоков биогенных элементов в оптимальном режиме определяется тем, что биогеохимическая модель цикла биогена (органического углерода, азота) позволяет просчитать потоки с учетом действия регулятора. Следует понимать, что гумус, как ключевая составляющая плодородия почвы, сам является одним из пулов накопления органического углерода и азота в соответствующих биогеохимических циклах. Моделирование биогеохимического цикла органического углерода и азота с интегрированными регуляторами процесса также позволит использовать все возможности для решения поставленной задачи и оценить их потенциал с точки зрения расширенного воспроизводства плодородия почвы.

Объектом исследований являются мелиорированные земли и технологии регулирования потоков биогенных элементов, рассматриваемые, соответственно, как среда и инструменты управления плодородием почвы. Предмет исследований – модели биогеохимического цикла органического углерода и азота, в которых технологии

рассматриваются как встраиваемые в цикл регуляторы процесса. Материалами исследований стали опубликованные данные по формированию потоков органического углерода и азота в агроэкосистеме [3, 5, 7, 8, 10-15]. Экспериментальная часть исследований выполнена на орошаемых землях Ленинского района Волгоградской области.

**Результаты и их обсуждение.** Основными резервуарами углерода в рамках малого биогеохимического

цикла, преимущественно определяющего баланс агроэкосистемы, являются атмосфера и биосфера (рис. 1). Последняя, в свою очередь имеет массу разнообразных пулов, из которых далеко не все относятся к агроэкосистеме. Относительно агроэкосистемы биотические пулы хранения углерода включают: фитоценоз, животный мир, мортмассу и органические отходы, микробиоту и гумусовые вещества.

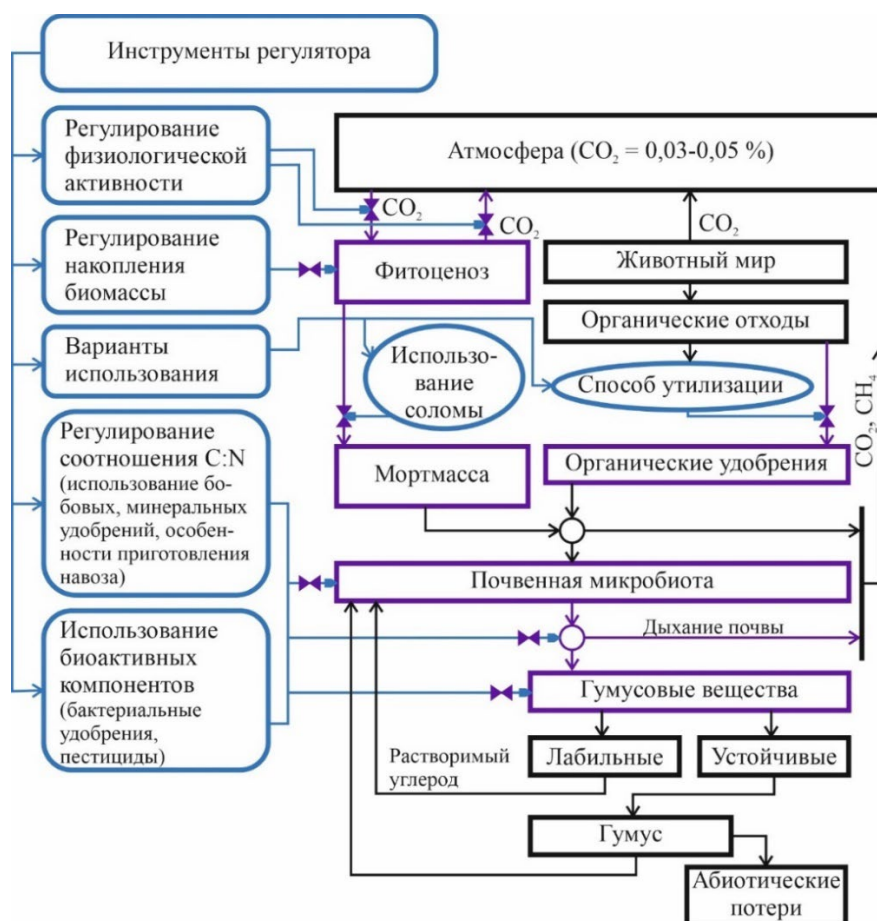


Рис. 1. Концептуальная модель биогеохимического цикла органического углерода с интегрированными регуляторами процесса

Атмосфера, несмотря на несравнимо малую концентрацию углерода относительно его общих запасов на Земле, является главным источником этого элемента для биоты. Потребление углерода атмосферы в процессе фотосинтеза – основной путь вовлечения этого биогенного элемента в биосферу, включая все без исключения биотические компоненты. Регулирование этого процесса является фундаментальным фактором управления обменом углеродом между атмосферой и биосферой. В качестве инструмента регулятора обмена углерода между атмосферой и биосферой рассматривается функция управления физиологической активностью растений. Причем данный инструмент действует на процесс как связывания атмосферного углерода (фотосинтез), так и его высвобождения (дыхание растений). Инструмент дополняется функцией регулирования накопления биомассы фитоценоза, которая, помимо управления физиологической активностью растений, предполагает и регулирование продолжительности периода, в течение которого это накопление происходит. В результате формируется масса фитоценоза, которая включает определенное (накопленное) количество органического углерода.

Накопленная фитомасса, рассматриваемая как продукт сельскохозяйственного производства, имеет три

направления использования. Часть фитомассы отчуждается и используется человеком (продукты питания, перерабатывающая промышленность и т.д.). Еще одна часть идет на кормление и содержание сельскохозяйственных животных, а корневые, пожнивные и другие остатки растений могут быть непосредственно возвращены в почву в форме мортмассы.

Сельскохозяйственные животные возвращают часть органического углерода в процессе дыхания, часть углерода накапливается в биомассе, а еще часть выделяется в форме органических отходов. Органические отходы являются важным пулом накопления углерода, варианты использования которого формируют еще один мощный инструмент регулирования углеродного цикла в агроэкосистеме. В этом плане рассматриваются различные способы утилизации органических отходов, в том числе, варианты приготовления органических удобрений.

Инструментом регулирования углеродного цикла на уровне формирования мортмассы могут стать варианты использования остатков сельскохозяйственных растений. Перспективным способом такого инструмента регулирования является применение соломы и стеблей сельскохозяйственных растений, непосредственно заделываемых в почву после уборки культуры.

Инструмент содержит ряд технологических параметров, оценка и правильная настройка которых позволяет максимально эффективно его использовать для регулирования углеродного цикла.

В таблице показаны результаты экспериментальной оценки регуляторного потенциала озимых колосовых и сои, которые позволяют провести количественный анализ эффективности использования растительных остатков.

**Показатели регуляторного потенциала сои и озимой пшеницы как источника азота и органического углерода в составе малого биогеохимического цикла (в среднем за 2021-2023 г.)**

Сорт (А)	Навоз КРС, т/га (В)	Обработка микроком- плексом (С)	Поживно-корневые остатки			Вегетативная компонента			Соотноше- ние С:N
			сухая био- масса, т/га	депонированный углерод, т/га	азот, кг/га	сухая био- масса, т/га	депонированный углерод, т/га	азот, кг/га	
Опыт 1, соя: факторы активизации физиологической активности									
Киото	0	-	1,44	0,72	10,4	3,46	1,73	59,9	29
>>	0	+	1,51	0,76	10,9	3,46	1,73	59,9	
>>	20	-	1,59	0,80	11,4	3,69	1,85	63,8	
>>	20	+	1,55	0,78	11,2	3,58	1,79	61,9	
Волгоградка 2	0	-	1,55	0,78	11,2	3,61	1,81	62,5	
>>	0	+	1,61	0,81	11,6	3,71	1,86	64,2	
>>	20	-	1,65	0,83	11,9	3,8	1,90	65,7	
>>	20	+	1,61	0,81	11,6	3,74	1,87	64,7	
НСР <sub>05</sub>	фактор А=В=С		0,06	0,05	0,3	0,09	0,06	1,4	-
Опыт 2, соя, озимая пшеница (с. Лидия): сравнительная оценка регуляторного потенциала									
Волгоградка 2	20	+	1,61	0,81	11,6	3,74	1,87	64,7	29
Зональная агротехника			1,72	0,86	3,7	4,82	2,41	24,6	98
НСР <sub>05</sub>			0,12	0,06	1,5	0,42	0,24	3,4	-

Результаты опыта позволяют оценить роль усиления физиологической активности, как фактора регулирования потоков органического углерода и азота в почве. В опытах с соей за счет этого регулятора поступление органического углерода удалось увеличить на 0,23 т/га, или на 9,4 %. За счет использования растительных остатков – соломы и половы, регуляторную роль сои в отношении органического углерода можно увеличить в 2,3-2,4 раза. Регуляторный потенциал озимой пшеницы в отношении органического углерода при условии использования соломы составляет 28,9 % больше, чем у сои.

Мортмасса сельскохозяйственных растений и органические удобрения вовлекаются в почвообразовательные процессы непосредственно с участием почвенной микробиоты. Направленность и интенсивность, суммирующие векторы процессов, в значительной мере определяются составом и активностью почвенной микробиоты. Инструменты, которые позволяют контролировать развитие и активность почвенных микроорганизмов, в значительной мере позволяют регулировать и процессы, связанные с трансформацией и миграцией органического углерода. Среди таких инструментов отдельно необходимо выделить регулирование соотношения С : N, как одного из факторов оптимальности развития микробиоты.

Варианты реализации этого инструмента регулятора: использование бобовых культур, пожнивных остатков и соломы которых уже оптимизирована по соотношению С : N, использование минерального азота для компенсации избытка органического углерода, и особенности приготовления органических удобрений. В опытах использования растительных остатков сои по этому показателю оказалось гораздо предпочтительнее, чем соломы озимой пшеницы (см. табл.).

Другой эффективный инструмент регулирования почвенной микробиоты – использование биоактивных компонентов. Такими компонентами могут быть бактериальные удобрения, или, напротив, какие-то токсичные вещества, пестициды, природные антибиотики и стимуляторы роста.

Основными потоками углерода в рамках рассматриваемого (малого) углеродного цикла, формируемыми в результате деятельности почвенных микроорганизмов, являются образование гумусовых веществ, выделение

метана (CH<sub>4</sub>) и диоксида углерода (дыхание почвы). Используя инструменты регулирования микробиотической компоненты почвы, можно оказывать влияние на эти потоки, изменять их интенсивность и соотношение, т.е. управлять циклом на этом уровне.

Гумусовые вещества – важнейший компонент углеродного цикла, так как определяют водные, физические, агрохимические свойства почвы – всю совокупность, характеризующую ее плодородие. Они делятся на лабильные, легко вовлекаемые в почвенные процессы (быстрая ветвь цикла), и устойчивые, участвующие в формировании наиболее стабильной органической составляющей почвы – гумуса (долгая ветвь цикла). И те и другие очень важны для плодородия почвы. Лабильные гумусовые вещества в значительной мере определяют эффективное плодородие почвы, могут быть быстро минерализованы с высвобождением питательных элементов, особенно азота. Эти процессы напрямую связаны с продукционным процессом растений и продуктивностью агрофитоценозов. Лабильные гумусовые вещества минерализуются в первую очередь, но их дефицит активизируют подобные процессы уже в отношении гумуса, снижая плодородие почвы. Лабильные и устойчивые гумусовые вещества, включая гумус, вовлекаются в замыкающую ветвь углеродного цикла: минерализации с участием почвенной микробиоты. Все инструменты, которые позволяют регулировать почвенную микробиоту, могут быть использованы и для управления процессами на стадии минерализации органического вещества. В совокупности это дает систему регуляторов, обеспечивающую возможность регулирования потоков органического углерода практически на каждом этапе малого углеродного цикла агроэкосистемы.

Основными резервуарами азота в рамках малого биогеохимического цикла, преимущественно определяющего баланс агроэкосистемы, являются атмосфера, осадочные породы, биосфера (рис. 2). Биосферные пулы малого азотного цикла, рассматриваемого, преимущественно, относительно агроэкосистемы, включают фитоценоз, животный мир, мортмассу, органические отходы, микробиоту и гумусовые вещества.

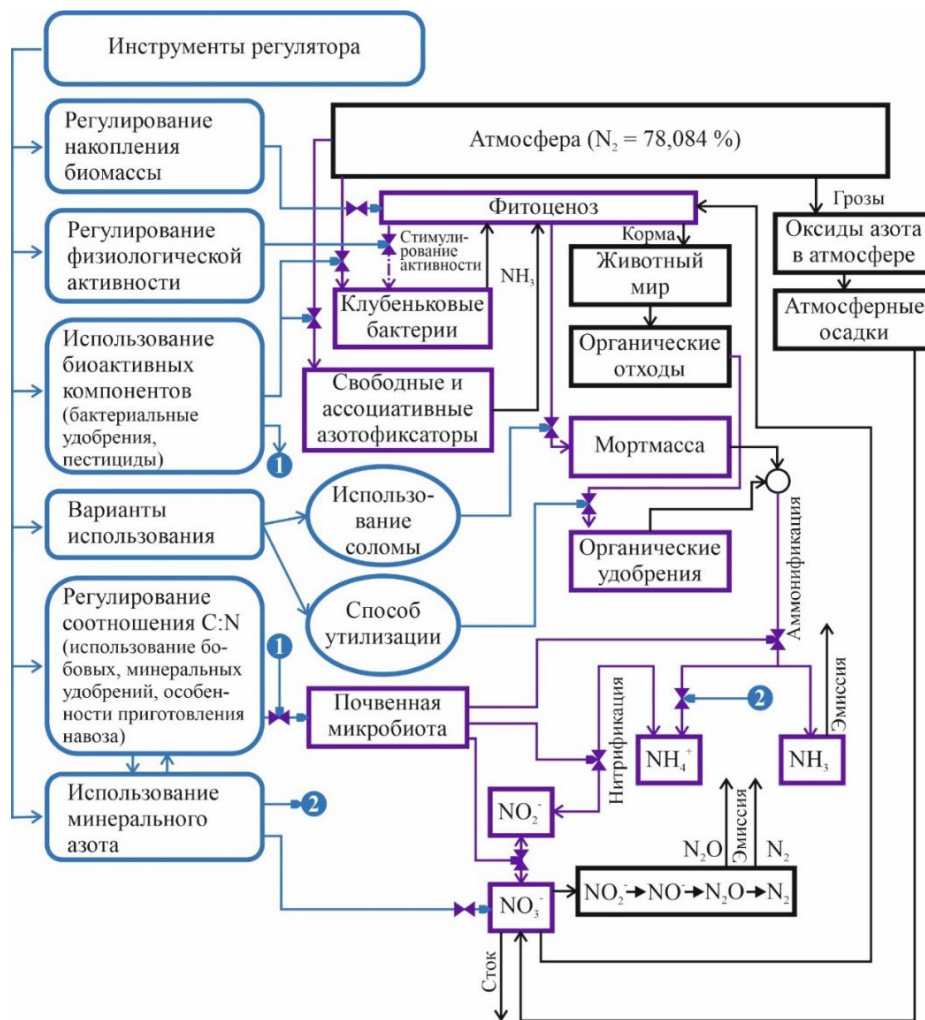


Рис. 2. Концептуальная модель биогеохимического цикла азота с интегрированными регуляторами процесса

Атмосфера содержит более 78 % азота, однако находится он в недоступной растениям и животным форме. Учитывая высокую степень мобильности азота, роль осадочных пород как источника азота в малом биогеохимическом цикле не стоит переоценивать.

Основной обмен азота в рамках рассматриваемого цикла происходит между атмосферой и живым миром, тогда как осадочные породы являются промежуточным хранилищем азота – материальной основой, в которой происходят основные процессы его трансформации и миграции.

Главным механизмом вовлечения атмосферного азота в биотическую ветвь малого азотного цикла является фиксация его свободноживущими почвенными микроорганизмами или клубеньковыми симбиозами. Поэтому использование биоактивных компонентов – один из основных инструментов регулирования прямой фиксации атмосферного азота и вовлечения его в биосферную ветвь цикла.

При этом особое внимание следует уделять использованию бактериальных удобрений, необходимых для создания (усиления) азотфиксирующих ассоциаций и клубеньковых симбиозов. Использование токсичных веществ также существенно влияет на азотфиксирующую деятельность бактерий и это следует учитывать при планировании агротехнических мероприятий.

Регулирование физиологической активности растений – мощный, хотя и опосредованный, инструмент, позволяющий оказывать существенное влияние на

азотфиксирующую деятельность клубеньковых симбиозов. Растение поставляет бактериям необходимые им для питания органические вещества, и стимуляция этого процесса сопровождается усилением роста и активности симбиоза. Ответом является увеличение объема фиксации азота и поступления его в растение.

Другим инструментом регулятора азотного цикла может стать регулирование накопления биомассы фитоценозами. Это не стимулирует активность азотфиксации, но позволяет регулировать продолжительность этого процесса, увеличивая общее количество вовлеченного в круговорот азота.

Накопленный фитоценозом азот частично отчуждается с той долей биомассы, которая непосредственно потребляется человеком, частично расходуется в составе белков растительных кормов животных, а частично возвращается в почву с мортмассой, формируемой из не используемых остатков растений. Эффективным инструментом регулятора на этом этапе могут стать варианты использования остатков растений. В частности, использование солоистой массы сои позволяет увеличить количество возвращаемого в почву азота на 59,9-65,7 кг/га (см. табл.). Регуляторный потенциал озимой пшеницы в этом плане существенно ниже: с солоистой биомассой возвращается около 24,6 кг/га азота.

Утилизация органических отходов животноводства в форме органических удобрений может стать еще одним мощным инструментом регулятора в той ветви азотного цикла, которая включает животный мир. Отходы



животноводства содержат значительную долю азота, которая при правильной обработке сохраняется в органических удобрениях.

Мортмасса и органические удобрения вовлекаются в процесс аммонификации, который реализуется при непосредственном участии почвенной микробиоты. Состав и активность почвенных микроорганизмов в значительной мере определяют динамику процесса. Эффективным инструментом регулятора цикла на этом этапе может стать использование биоактивных компонентов (бактериальные удобрения, пестициды), а также оптимизация соотношения C:N почвенной органики. Эти инструменты позволяют контролировать активность почвенной микробиоты, от которой, в свою очередь зависят все процессы, связанные с аммонификацией, нитрификацией, денитрификацией.

Часть аммонифицированного азота теряется с эмиссией аммиака на стадии разложения органических остатков растений и отходов животных. Ионы аммония при непосредственном участии нитрифицирующих бактерий трансформируются в нитриты и нитраты, которые, вследствие своей большой подвижности, играют важную роль в азотном питании растений. Одновременно протекают и обратные процессы образования аммонийных форм азота из нитритов, – соотношение этих процессов также регулируется почвенной микробиотой.

Содержание нитратов в почве определяет наличие доступных форм азота и характеризует эффективное плодородие почвы. В формировании высокопродуктивных агрофитоценозов это соединение настолько важно, что нитратные удобрения во всем мире стали неотъемлемым признаком интенсивного аграрного производства. Этот инструмент сегодня является одним из основных в регулировании данного этапа азотного цикла в агроэкосистемах. Следует, однако, учитывать и возможность активизации процессов, сопутствующих накоплению  $\text{NO}_3$  в почве, таких как образование  $\text{N}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  с эмиссией в атмосферу, формирование стока нитратов в подземные и поверхностные воды в растворах.

Важно также контролировать использование минерального азота, чтобы это не стало дестабилизирующим фактором формирования оптимального соотношения C : N по отношению к разлагаемым органическим остаткам.

Таким образом, потери азота в малом биогеохимическом цикле определяются: отчуждением биомассы растений и животного мира человеком, эмиссией аммиака при разложении органики, денитрифицирующими потерями, а также стоком нитратов в подземные и поверхностные воды. Некоторые из этих статей могут быть минимизированы за счет подключения регулятора процессов и использования, обозначенных выше инструментов регулятора. Для поддержания эффективного плодородия почвы эти потери должны быть восполнены, предпочтительно, за счет биологической фиксации азота. Использование синтетических форм азота допустимо, но в пределах, не превышающих оптимальное соотношение C : N применительно к разлагаемым формам органики.

**Заключение.** Концептуальная модель биогеохимического цикла органического углерода и азота с интегрированными регуляторами процесса построена на основе современных представлений о формировании потоков и баланса этих веществ и ориентирована на агроэкосистемы, которые, помимо природных процессов,

предполагают антропогенное воздействие и возможность осуществления регуляторных функций. Регуляторы процесса интегрированы в состав биогеохимических циклов на разных уровнях и представлены технологиями, которые используются или могут быть применены в рамках производственных циклов. К таким технологиям относятся: приемы регулирования физиологической активности растений и накопления биомассы, способы использования накопленной биомассы, отходов животноводства, как промежуточного звена углеродного цикла, способы регулирования соотношения C : N поступающего в почву органического вещества, технологии управления составом и активностью почвенной микробиоты. В качестве примера приведены результаты количественного анализа регуляторного потенциала зернобобовой сои и озимой пшеницы для решения задачи комплексного управления потоками органического углерода и азота в почве. Использование модели позволяет решать эту задачу системно на разных уровнях биогеохимического цикла, эффективно используя все возможности современных агротехнологий.

#### Литература

1. Алексеева Т.В., Золотарева Б.Н., Колягин Ю.Г. Негидролизующий остаток органического вещества погребенных и современных почв // Почвоведение. – 2019. – № 6. – С. 687-699. DOI: 10.1134/S0032180X19060029
2. Бойко В.С., Тимохин А.Ю., Михайлов В.В. Плодородие орошаемых земель в южной лесостепи Омской области // Таврический вестник аграрной науки. – 2021. – № 4 (28). – С. 40-49. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-4-28-40-49
3. Борисова Т.С., Чимитдоржиева Г.Д. Биологическая активность дефлированных каштановых почв при длительном компостировании // Агрохимия. – 2004. – № 3. – С. 14-20.
4. Джавадов Н.Г., Казимова Ф. О возможности использования цветового признака для дистанционного определения количества органических веществ в почве // Природообустройство. – 2019. – № 4. – С. 41-47. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-41-47
5. Докучаева Л.М., Юркова Р.Е. Влияние длительного орошения на почвообразовательные процессы темно-каштановых почв // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2017. – № 2 (66). – С. 198-204.
6. Кирейчева, Л. В. Модели и информационные технологии управления водопользованием на мелиоративных системах, обеспечивающие благоприятный мелиоративный режим / Л. В. Кирейчева, И. Ф. Юрченко, В. М. Яшин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2014. – № 5-6. – С. 50-55.
7. Регулирование кислотного и гумусового состояния деградированных мелиорированных земель Нечерноземной зоны при их вовлечении в сельскохозяйственный оборот / В. А. Шевченко, А. М. Соловьев, Г. И. Бондарева, Н. П. Попова // Научно-методическое обеспечение развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса: Сборник научных трудов. – М.: ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2020. – С. 197-206.
8. Каличкин В.К., Малыгин А.Е., Комна А.С. Динамика запасов углерода и азота микробной биомассы в темно-каштановой почве под влиянием сидерации // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2007. – № 2 – (170). – С. 17-23.
9. Карпенко Н.П., Егембердиев Д.К. Повышение плодородия малопродуктивных сероземных почв с применением биомелиоранта при капельном орошении // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 3. – С. 29-35. DOI: 10.34286/1995-4646-2019-66-3-29-35
10. Полуэктов Р.А. Динамика микробной популяции в рамках модели трансформации азота в почве // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – № 6. – С. 33-35.
11. Пронько В.В., Журавлев Д.Ю., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Сайфуллина Л.Б. Трансформация соединений углерода, азота и фосфора в черноземе южном при длительном применении минеральных удобрений // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 3. – С. 51-58. DOI: 10.28983/asj.y2023i3pp51-58.
12. Суховеева О.Э. Проблемы моделирования биогеохимического цикла углерода в агроландшафтах // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2020. – Т. 162. – № 3. – С. 473-501. DOI: 10.26907/2542-064X.2020.3.473-501
13. Регулирование баланса потоков биогенных элементов в агроэкосистемах осваиваемых и старопашотных земель Нечерноземной зоны / В. А. Шевченко, Н. С. Матюк, А. М. Соловьев [и др.]. – М.: ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2022. – 161 с. – ISBN 978-5-907464-22-3.

14. *Оптимальное управление поливами на основе современных вычислительных алгоритмов* / В. В. Бородычев, М. Н. Лытов, А. С. Овчинников, В. С. Бочарников // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 4(40). – С. 21-28.  
15. *Шадских В.А., Кижасева В.Е., Романова Л.Г.* К вопросу влияния орошения на плодородие почв степной и сухостепной зон Поволжья // Орошаемое земледелие. – 2019. – № 4. – С. 46-49.

16. *Агро-мелиоративные приемы восстановления плодородия деградированных и вышедших из оборота сельскохозяйственных земель и пастбищных территорий* / В. А. Шевченко, Э. Б. Дедова, Н. З. Шамсутдинов [и др.]; Под ред. акад. РАН В.А. Шевченко. – М.: ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2022. – 205 с.  
17. *Rusakova I.V.* Microbiological and ecophysiological parameters of sod-podzolic soil upon long-term application of straw and mineral fertilizers, the correlation with the yield // Agricultural Biology. – 2020. – V. 55. – N 1. – P. 153-162.

## CONCEPTUAL MODELING OF THE BIOGEOCHEMICAL CYCLE OF ORGANIC CARBON AND NITROGEN WITH INTEGRATED PROCESS REGULATORS

V.A. Shevchenko, M.N. Lytov

Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova

*The aim of the study was to develop a conceptual model of the bio-geochemical cycle of organic carbon and nitrogen with integrated process regulators. The research is based on modern ideas about the formation of a small biogeochemical cycle of organic carbon and nitrogen. The model is focused on agroecosystems, which, in addition to natural processes, assume anthropogenic impact and the possibility of implementing regulatory functions. Experimental estimates of the regulatory potential of leguminous soybeans and winter wheat have been obtained, which confirm that no more than 0.83 t/ha of organic carbon enters the soil with crop-root residues. However, this level can be increased 2.3-2.4 times due to the use of aboveground soybean biomass and 5.6 times when using aboveground biomass of winter wheat. The model makes it possible to organize the effective operation of regulators at different levels of the biogeochemical cycle.*  
Keywords: biogeochemical cycle, organic carbon, nitrogen, model, process regulators

УДК 631.8:633.1:631.559

DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.17

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В БАССЕЙНЕ Р. ОКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗНЫХ ДОЗ УДОБРЕНИЙ

Л.С. Шарая<sup>1\*</sup>, О.В. Рухович<sup>1</sup>, П.А. Шарый<sup>1, 2</sup>, А.В. Навров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино, Россия, \*E-mail: l\_sharaya@mail.ru*

*Проведен сравнительный анализ изменений в пространстве характеристик урожайности озимой пшеницы, полученных при применении разных доз удобрений в различных полевых опытах на западе Окского бассейна. С помощью множественной регрессии показано, что урожай озимой пшеницы, полученный на контроле (К), средний урожай (О), при применении разных доз, и максимальный урожай для оптимальных доз удобрений (Ох) зависят от температуры июня и осадков июля. Для О и Ох важен рельеф: они больше на юго-западных склонах. Для прибавок от внесения удобрений О-К и Ох-К важны освещенность и типы почв. Даны полученные от регрессии карты К, О, Ох, О-К и Ох-К.*

*Ключевые слова: озимая пшеница, пространственная изменчивость, множественная регрессия, удобрения, климат, экспозиция, освещенность склонов.*

Для цитирования: Шарая Л.С., Рухович О.В., Шарый П.А., Навров А.В. Сравнительное изучение пространственной изменчивости характеристик урожайности озимой пшеницы в бассейне р. Оки при использовании разных доз удобрений // Плодородие. – 2024. – №5. – С. 80-85. DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.17.

Влияние природных факторов на эффективность действия удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур освещалось во многих работах [1-4 и др.]. Показано, что урожайность зерновых культур в многолетних экспериментах на южных склонах была достоверно выше, чем на северных [5, 6]. Отмечалось, что потоки солнечной энергии находятся под влиянием крутизны, азимута и высоты, поскольку ими модифицируется падающая радиация [2]. Используя анализ многочисленных литературных данных, была сформирована концепция агроэкологической неравнозначности склонов [1], различающихся экспозицией.

Ранее нами были рассчитаны пространственные модели урожаев и прибавок урожаев озимой пшеницы в регионе Окского бассейна на основе их связей с

мезорельефом [3]. В полученных моделях климатические характеристики не применяли. Позже на примере прибавки урожая озимой пшеницы проведено пространственное моделирование с помощью множественной регрессии при использовании климата, рельефа и типов почв [7]. Однако, в литературе неизвестны сравнения связей с факторами окружающей среды различных характеристик урожайности (контроля, опыта и прибавки к контролю за счет внесения удобрений), в то время как эти связи могут сильно различаться.

**Цель нашего исследования** – выявить и сравнить закономерности пространственных изменений в регионе озимой пшеницы с помощью характеристик ее урожайности, различных доз вносимых удобрений при использовании широкого спектра показателей климата и рельефа.