

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.45:57.014

doi: 10.31774/2712-9357-2024-14-1-51-70

Обобщенная модель управления потоками органического углерода и азота на мелиорированных землях

Михаил Николаевич Лытов

Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Волгоград, Российская Федерация, LytovMN@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

Аннотация. Цель: разработка системного подхода в решении проблемы плодородия почвы на основе модели управления потоками органического углерода и азота на мелиорированных землях. **Материалы и методы:** рабочая гипотеза исследования состоит в предположении о возможности создания системы инструментов для регулирования потоков органического углерода и азота, работающих в рамках принципа природоподобия и обеспечивающих комплексное регулирование факторов почвообразования и повышения продуктивности агроэкосистем. **Результаты.** Исследованиями разработана концептуальная модель управления потоками органического углерода и азота на мелиорированных землях. Модель включает количественный расчет циклов органического углерода и азота в агроэкосистемах, выработку сценарных прогнозов, выработку управляющего решения и оценку последствий его исполнения, определение основных параметров регулятора, определение состава и вариантов использования инструментов регулятора, организацию мониторинга процесса и оценку сценарных прогнозов по фактическим данным. В модели детализирована структура регулятора процессов цикла углерода и азота для агроэкосистем. Регулятор включает инструменты воздействия на малые азотный и углеродный циклы, возможные способы реализации инструмента в практическом приложении и технологии, посредством которых осуществляется воздействие, с конкретизированными для частного случая параметрами и ограничениями. Основными инструментами регулятора являются: регулирование физиологической активности растений, регулирование накопления фитомассы, регулирование оборота фитомассы, регулирование оборотов отходов животноводства, регулирование соотношения C:N, регулирование активности почвенной микробиоты. **Выводы:** разработана концептуальная модель управления потоками органического углерода и азота, включающая систему инструментов для комплексного регулирования факторов почвообразования и повышения продуктивности агроэкосистем.

Ключевые слова: мелиорированные земли, плодородие почвы, азот, органический углерод, модель управления, инструмент регулятора

Для цитирования: Лытов М. Н. Обобщенная модель управления потоками органического углерода и азота на мелиорированных землях // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 1. С. 51–70. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-1-51-70>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

The generalized model of organic carbon and nitrogen flow management on reclaimed lands

Mikhail N. Lytov

All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Volgograd, Russian Federation, LytovMN@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

Abstract. Purpose: to develop a systematic approach to solving the problem of soil fertility based on a model for managing the flows of organic carbon and nitrogen on reclaimed lands. **Materials and methods:** the working hypothesis of the study is the assumption of the possibility of creating a system of tools for regulating the flows of organic carbon and nitrogen, working within the framework of the principle of nature-likeness and ensuring comprehensive regulation of soil formation factors and increasing the agroecosystem productivity. **Results.** The conceptual model for managing organic carbon and nitrogen flows on reclaimed lands was developed. The model includes a quantitative calculation of the organic carbon and nitrogen cycles in agroecosystems, the development of scenario forecasts, the development of a control decision and assessment of its execution consequences, the determination of the basic controller's parameters, the determination of the composition and options for using the controller's tools, the organization of process monitoring and the assessment of scenario forecasts for actual data. The controller structure of carbon and nitrogen cycle processes for agroecosystems is detailed by the model. The controller includes tools for influencing small nitrogen and carbon cycles, possible ways to implement the tool in a practical application and technologies through which the impact is carried out, with parameters and restrictions specified for a particular case. The basic controller tools are: the plant physiological activity regulation, the phytomass accumulation regulation, the phytomass turnover regulation, the circulation of animal waste regulation, the C:N ratio regulation, the regulation of soil microbiota activity. **Conclusions:** a conceptual model for managing the flows of organic carbon and nitrogen including a system of tools for the integrated regulation of soil formation factors and increasing the productivity of agroecosystems has been developed.

Keywords: reclaimed land, soil fertility, nitrogen, organic carbon, management model, regulator controller

For citation: Lytov M. N. The generalized model of organic carbon and nitrogen flow management on reclaimed lands. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2024;14(1):51–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-1-51-70>.

Введение. Органический углерод и азот – ключевые биогенные элементы в почвообразовании и формировании плодородия почвы [1–5]. Потоки этих элементов, как правило, специфичны для разных почвенно-климатических зон, определяют суммарный вектор почвообразовательных процессов, а в региональном аспекте – тип почвы и потенциальное плодородие земельных ресурсов. Региональный аспект в формировании типов и плодородия почвы очень важен, так как определяет те рамки, ту совокупность внешних условий, в которых длительное время формировались почвы. Сельскохозяйственное использование земель внесло существенные коррективы в процессы почвообразования, нарушая естественный оборот

биогенных элементов. Уже с древних времен проблема плодородия почвы на возделываемых угодьях становится актуальной, а в отдельных случаях приобретает глобальное значение.

Сегодня проблема сохранения и расширенного воспроизводства почвенного плодородия стоит не менее остро [6–9]. Быстро растущее население нашей планеты определяет активно возрастающую потребность в продукции сельского хозяйства. При глобальной ограниченности земельных ресурсов увеличивать производство продуктов питания и другого сельскохозяйственного сырья приходится за счет интенсификации технологий [10–12]. Использование гидротехнических мелиораций в этом плане является одним из наиболее мощных факторов интенсификации сельскохозяйственного производства. Наряду с этим гидромелиоративные технологии наиболее глубоко встраиваются во все природные процессы и преобразуют их, определяют новую совокупность условий для почвообразования. Неотъемлемым спутником гидромелиоративных технологий стало применение минеральных удобрений [13, 14]. Однако минеральные формы внесения ряда биоогенных элементов формируют нетипичные для естественной природной среды механизмы вовлечения в круговорот. Использование таких технологий требует крайне осторожного подхода и должно быть всесторонне обосновано. Целью настоящего исследования является разработка системного подхода в решении проблемы плодородия почвы на основе модели управления потоками органического углерода и азота на мелиорированных землях.

Материалы и методы. За основу при разработке системного подхода в решении проблемы сохранения и расширенного воспроизводства плодородия почвы был принят принцип природоподобия [15]. Принцип определяет необходимость использования приемов регулирования потоков биоогенных элементов, максимально копирующих процессы, свойственные естественной природной среде. В естественной природной среде все протекающие процессы сбалансированы и поддерживают экосистему на опре-

деленном уровне. Эта сбалансированность в значительной мере определяется и той совокупностью механизмов, которые реализуют протекающие процессы, которые в конечном итоге определяют круговорот веществ и биогенных элементов. Рабочей гипотезой исследования стало предположение о возможности создания системы инструментов для регулирования потоков органического углерода и азота, работающих в рамках принципа природоподобия и обеспечивающих комплексное регулирование факторов почвообразования и повышение продуктивности агроэкосистем.

Разрабатываемая модель управления базируется на различных моделях денитрификации-разложения, построенных для прогнозирования процессов, связанных с трансформацией и миграцией органического углерода и азота, с учетом динамического аспекта, и может использовать такие модели. Однако основное внимание уделяется определению тех точек приложения и технологий, которые на разных этапах могли бы стать эффективными инструментами регулирования потоков органического углерода и азота на сельскохозяйственном поле.

Объектом исследования являются циклы органического углерода и азота в агроэкосистеме как ключевые факторы сохранения и расширенного воспроизводства плодородия почвы. Предмет исследований – модели биогеохимического цикла органического углерода и азота в агроэкосистемах со встраиваемыми регуляторами процесса. Материалами исследования стали результаты, полученные ранее отечественными и зарубежными учеными, в области моделирования потоков органического углерода и азота, формирования баланса биогенных элементов в агроэкосистеме, почвообразования и мелиоративных технологий [16–24].

Результаты и обсуждение. Укрупненный алгоритм решения задачи управления углеродным и азотным циклами в агроэкосистемах включает:

- моделирование циклов органического углерода и азота в агроэкосистемах;

- выработку сценарных прогнозов по углеродному и азотному циклам;
- выработку управляющего решения;
- оценку последствий исполнения управляющего решения;
- определение основных параметров регулятора;
- определение состава и использования инструментов регулятора;
- мониторинг процесса и оценку сценарных прогнозов по фактическим данным.

Данный алгоритм был принят за основу при разработке обобщенной модели управления потоками органического углерода и азота на мелиорированных землях (рисунок 1).

Основным инструментом сценарных прогнозов являются модели, с достаточной степенью детализации описывающие циклы биогенных элементов в агроэкосистеме, или прогностически значимые модели реплик этих циклов. В таком качестве можно использовать известную модель CENTURY, которая описывает круговорот питательных веществ между растениями и почвой, была разработана и использовалась для моделирования динамики углерода и питательных веществ в различных типах экосистем [25]. Минимальная конфигурация модели включает органический углерод и азот, однако может быть существенно расширена и на другие элементы питания растений.

Одной из наиболее ранних моделей, имеющих практическую значимость в составлении сценарных прогнозов по потокам биогенных элементов, является модель NCSOIL [26]. Вычислительные алгоритмы направлены на определение динамики органических соединений углерода и азота, аммония и нитратов. Учитываются процессы разложения остатков, минерализации, иммобилизации, нитрификации и денитрификации.

Одной из успешных моделей потоков биогенных элементов, разработанных отечественными учеными, является модель ROMUL [27]. Теоретической базой модели является математическая формализация концепции

форм гумуса, позволяющая нормировать скорость минерализации углерода и азота по их соотношению в свежем опаде и в почве. Алгоритмы модели позволяют имитировать напочвенное и внутрипочвенное поступление и дальнейшую трансформацию опада отдельно в органическом и минеральном горизонтах почвы.

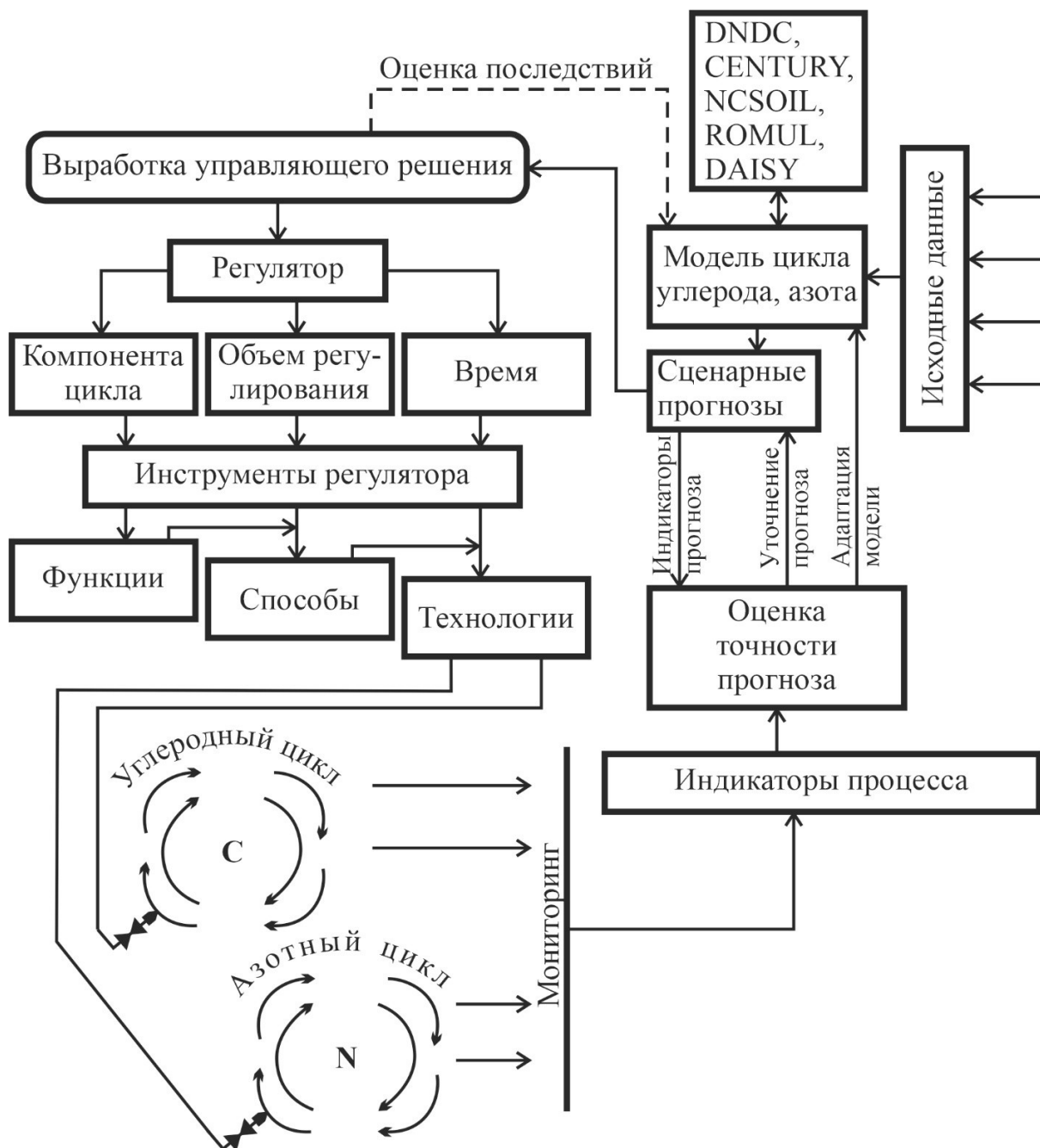


Рисунок 1 – Обобщенная модель управления потоками органического углерода и азота на мелиорированных землях

Figure 1 – Generalized organic carbon and nitrogen flow control model on reclaimed lands

Еще одно известное решение – DAISY – является хорошо протестированной динамической моделью, цель которой – имитировать водный баланс, баланс азота и потери, накопление органического вещества в почве, а также рост и производство сельскохозяйственных культур в севооборотах при альтернативных стратегиях управления [28].

Наиболее широкое распространение сегодня получила модель денитрификации-разложения DNDC [29]. В настоящее время она считается одной из наиболее успешных моделей в мире для моделирования наземных биогеохимических циклов. Модель может масштабироваться с ограниченными корректировками, ее коэффициенты верифицированы для более чем 100 культур в самых разных географических точках, включая практически весь мир. Много исследований, посвященных верификации коэффициентов и использованию этой модели для решения различных задач, проведено в Российской Федерации.

Сценарии вырабатываются на основе модельных решений с учетом фактического состояния окружающей среды и факторов влияния, верифицируемых в модели подстановкой определенного набора исходных данных, которые конкретизируют решаемую задачу.

Выработка управляющего решения в отношении регулирования потоков органического углерода и азота осуществляется на основе сценарного прогноза путем определения потребности в корректировке циклов. Определение потребности в корректировке циклов осуществляется на основе сравнения прогнозируемых и заданных значений критерия. Критериями выработки управляющего решения, в зависимости от расставленных приоритетов и решаемой задачи, могут быть показатели, характеризующие эффективное плодородие почвы, динамика накопления стабильных (устойчивых) гумусовых веществ. При этом следует учитывать, что невозможно одновременно достичь максимального плодородия почвы, движе-

ние должно быть постепенным, шаг за шагом, в рамках тех экологических ограничений, которые допускает экосистема.

Управляющее решение передается регулятору, алгоритмы которого предусматривают разработку основных параметров управляющего действия. Регулятор определяет, на каком этапе, на какой компонент углеродного или азотного цикла необходимо воздействовать, каков объем этого воздействия, время начала, продолжительность и характер воздействия, а также устанавливает, какие инструменты необходимо задействовать.

Инструмент регулятора – это особая, комплексная единица, которая имеет функцию как основу регуляторного действия, включает способы регулирования как варианты исполнения функции и технологии, которые конкретизируют выбранные (выбранный) способы регулирования для решения задачи в частном случае. Технологии в частном приложении и являются тем физическим инструментом воздействия регулятора, при помощи которого осуществляется регуляторное действие в отношении выбранных компонентов углеродного или (и) азотного циклов. Технология в полной мере включает параметры регулятора, т. е. уже ориентирована на конкретный компонент (или компоненты) цикла, обладает определенным регуляторным потенциалом (объемом воздействия), включает все необходимые временные отметки.

Решение задачи управления потоками биогенных элементов предполагает оценку последствий, которая заключается в том, что в модель цикла включаются новые исходные данные, содержащие сведения о тех регуляторных воздействиях, которые предполагается выполнить. Модель проигрывается с учетом регуляторного действия, формируются новые сценарные прогнозы, на основании чего делается вывод об ожидаемом эффекте, а также о необходимости уточнения управляющего решения.

Предложенная модель предполагает также физический мониторинг последствий регуляторного действия уже на основе фактических значений

индикаторов процесса. Индикаторные показатели могут быть использованы для оценки точности прогнозов, их уточнения и адаптации модели цикла путем точной настройки коэффициентов в заданных условиях.

Одним из ключевых структурных элементов предлагаемой модели управления потоками органического углерода и азота в агроэкосистемах является регулятор. Это тот самый компонент, который непосредственно отвечает за преобразование выработанного управляющего решения в физическое воздействие, посредством которого регулирование потоков органического углерода и азота как раз и осуществляется. На рисунке 2 представлена концептуальная модель регулятора процессов цикла углерода и азота в агроэкосистемах. Инструменты регулятора, позволяющие решать задачи в тех рамках, которые мы обозначили, включают выполнение следующих функций:

- регулирование физиологической активности растений. Оно, в частности, позволяет реализовать управляющее действие в отношении поглощения двуокси углерода (CO_2) при фотосинтезе и в отношении обратного процесса – дыхания, определяя, таким образом, величину чистого баланса. В отношении цикла азота необходимо учитывать регуляторное действие физиологической активности растений в отношении азотофиксирующих бактерий-симбионтов, а также ризосферных азотофиксаторов;

- регулирование накопления фитомассы. Функция тесно связана с физиологической активностью растений, однако не тождественна ей. Регулирование структуры растений, оптимизация временных параметров использования дают дополнительные инструменты управления накоплением фитомассы;

- регулирование оборота фитомассы. То, как будет использована накопленная фитомасса, является мощным фактором формирования потоков органического углерода и азота в агроэкосистеме;

- регулирование оборота отходов животноводства. Животные являются промежуточным звеном оборота фиксированного из атмосферы углерода

и потребляемого растениями азота. Часть этих биогенных элементов возвращается в атмосферу в результате естественных физиологических процессов. Однако другая часть выделяется в форме отходов животноводства и может быть использована регулятором для применения в другой ветви цикла;

- регулирование соотношения C:N. Регулирование этого соотношения оказывает существенное влияние на развитие и активность почвенной микробиоты, определяя динамику почвообразовательных процессов. Все процессы разложения, иммобилизации, нитрификации, денитрификации – их интенсивность и динамика – самым непосредственным образом связаны с соотношением органического углерода и азота в почве;

- регулирование активности почвенной микробиоты. Помимо соотношения C:N, которое само по себе является мощным фактором развития почвенной микрофлоры, существует еще целый комплекс факторов, с помощью которых можно регулировать микробиотическую активность. Кроме того, имеется возможность регулирования структуры почвенной микробиоты, что также имеет большое значение в решении задачи управления потоками биогенных элементов.

Каждая из обозначенных функций регулятора может быть реализована различными способами либо их сочетанием (см. рисунок 2). Наиболее мощные факторы регулирования физиологической активности растений и накопления фитомассы посевами – управление водным режимом почвы, использование удобрений, листовых подкормок, стимуляторов роста, регулирование микроклимата, оптимизация агротехнического комплекса. Применительно к конкретным условиям способы реализуются определенными, наиболее подходящими для частного случая технологиями. В частности, для аридной зоны регулирование водного режима почвы обеспечивается орошением, тогда как в гумидной зоне необходим дренаж. Использование удобрений и стимуляторов роста наиболее эффективно при учете почвенных условий, особенностей климата, биологии возделываемой культуры и т. д.

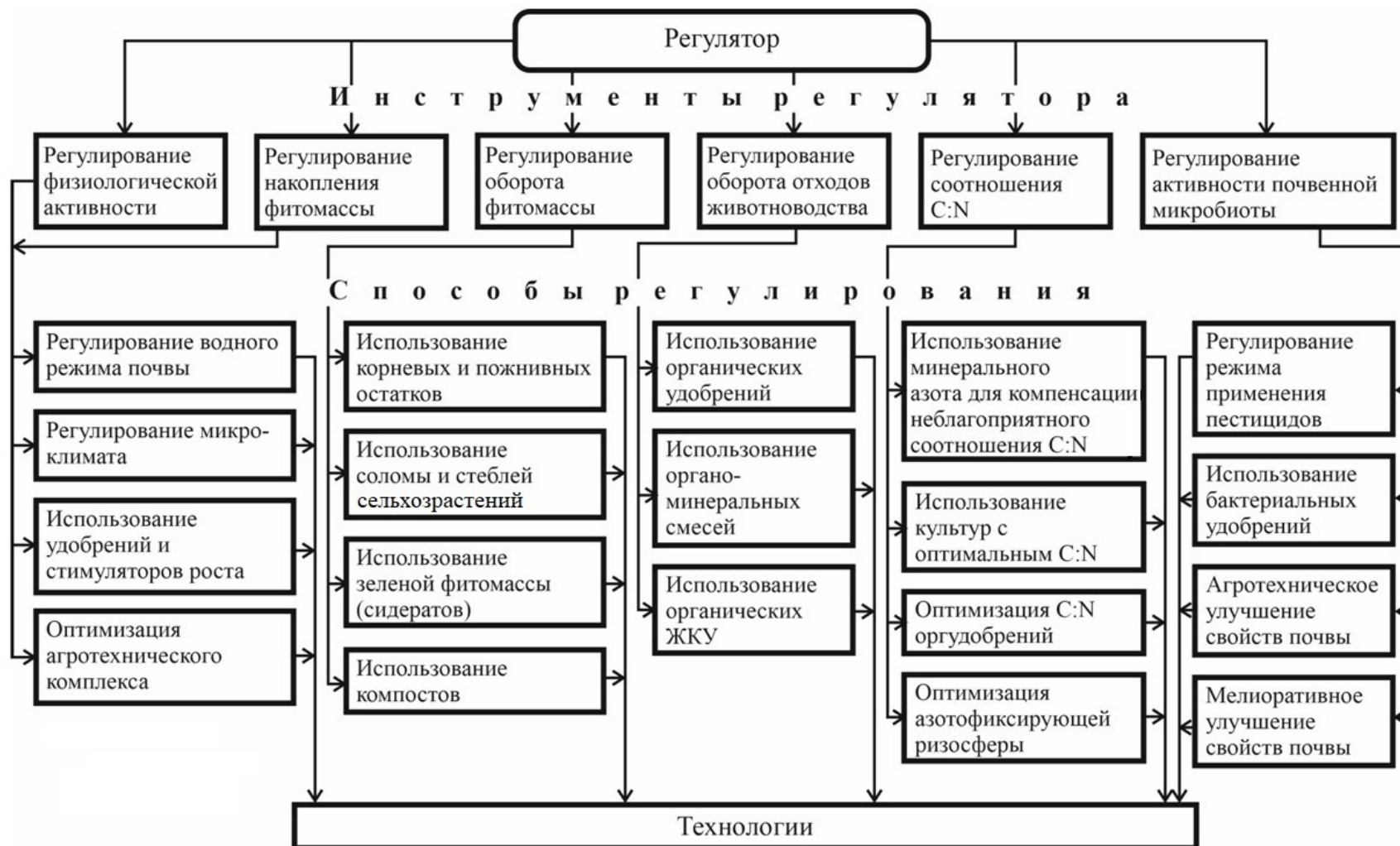


Рисунок 2 – Концептуальная модель регулятора процессов биогеохимического цикла углерода и азота в агроэкосистемах
Figure 2 – Conceptual model of the controller of the processes of carbon and nitrogen biogeochemical cycle in agroecosystems

Проведенные нами ранее в посевах сои исследования [30–32] показали, что за счет оптимизации водного режима почвы, условий минерального питания, использования бактериальных удобрений, регулирования архитектоники можно добиться увеличения чистой продуктивности фотосинтеза на 10–18 %, фотосинтетического потенциала посева на 12–32 % и суточной динамики прироста сухого вещества на 17–38 %. В результате наблюдается почти двукратный (в 1,9 раза) рост накопленного посевами органического вещества и, соответственно, емкости растительного пула по органическому углероду и азоту. Обеспечивается положительный баланс азота, значительную часть которого составляет азот биологической фиксации [33].

Способы регулирования оборота фитомассы включают использование корневых и пожнивных остатков, использование соломы и стеблей сельскохозяйственных растений, использование зеленой фитомассы и компостов. Перераспределение фитомассы может в значительной мере определять потоки биогенных элементов, особенно органического углерода.

В опытах с соей [34] использование соломы и половы этой культуры позволило нам в 2,3–2,4 раза увеличить поступление в почву органического углерода и в 5,2–5,5 раза – поступление азота в органических соединениях. Вовлечение в оборот соломы и половы озимой пшеницы (с. Лидия) увеличило поступление органического углерода в почву в 5,2 раза, однако соотношение C:N (98) оказалось в значительной степени не оптимальным.

Таким образом, регулирование оборота фитомассы является достаточно мощным фактором, который имеет в своем арсенале уже отработанные и апробированные технологии. Тем не менее оптимизация подобных технологий включает существенный региональный аспект. Поэтому исследования в данном направлении остаются актуальными.

Способы регулирования оборота отходов животноводства включают использование органических удобрений, применение различного рода смесей обработанных отходов с минеральными компонентами, использование

жидкой фракции отходов животноводства. Отходы животноводства включают практически всю таблицу биогенных элементов и хорошо обеспечены наиболее важными из них. Содержание органического углерода в органических удобрениях животного генезиса составляет 21–28 % (до 77 % в пересчете на сухое вещество), а азота 0,54–0,86 %. Коэффициент гумификации органических удобрений может достигать 30 % [35]. Использование отходов животноводства является мощным фактором регулирования потоков органического углерода и азота в почве.

Регулирование соотношения C:N может быть практически реализовано за счет использования минеральных форм азота, применения соломенной массы, корневых и пожнивных остатков культур с оптимальным C:N, использования обоснованных технологий приготовления органических удобрений, а также за счет активизации азотофиксирующей ризосферы. При этом особое внимание следует обратить на использование биомассы культур с оптимальным соотношением C:N, так как только эта технология не требует никаких дополнительных затрат ресурсов и может быть наиболее выгодна аграриям.

Почвенная микробиота играет большую роль в регулировании потоков биогенных элементов. Микроорганизмы участвуют в иммобилизации биогенных элементов, играя роль биологического «демпфера с таймером», высвобождают и преобразуют химические соединения, фиксируют и выделяют газообразные вещества. Микроорганизмы участвуют в регуляции большинства ветвей потока, а также формируют новые потоки азотного и углеродного циклов. Управление активностью и соотношением почвенных микроорганизмов включает регулирование режима применения пестицидов, использование бактериальных удобрений, улучшение агротехнических свойств почвы, проведение мероприятий мелиоративного плана.

Каждый из способов регулирования реализуется посредством технологий, имеющих уже конкретную привязку к каждой частной решаемой

задаче. Способ регулирования может иметь несколько альтернативных технологий или совокупность взаимно дополняющих технологий, которые применяются с учетом специфики поставленной задачи и совокупности факторов внешнего окружения. При обосновании выбора технологии необходимо учитывать их комплексное действие на всю совокупность почвообразовательных процессов, экологию окружающей среды, ресурсопотребление, экономику производства и т. д. Технологии завершают модель регулятора, замыкая ее уже на практическое действие по регулированию потоков органического углерода и азота в агроэкосистеме.

Выводы. Предложена концептуальная модель управления потоками органического углерода и азота на мелиорированных землях. Модель включает количественный расчет циклов органического углерода и азота в агроэкосистемах, выработку сценарных прогнозов, выработку управляющего решения и оценку последствий его исполнения, определение основных параметров регулятора, определение состава и использования инструментов регулятора, организацию мониторинга процесса и оценку сценарных прогнозов по фактическим данным. В модели детализирована структура регулятора процессов цикла углерода и азота для агроэкосистем. Регулятор включает инструменты воздействия на малые азотный и углеродный циклы, возможные способы реализации инструмента в практическом приложении и технологии, посредством которых осуществляется воздействие, с конкретизированными для частного случая параметрами и ограничениями. Основными инструментами регулятора являются: регулирование физиологической активности растений, регулирование накопления фитомассы, регулирование оборота фитомассы, регулирование оборота отходов животноводства, регулирование соотношения C:N, регулирование активности почвенной микробиоты. Модель определяет потенциальную совокупность точек приложения регуляторного действия, функции регулятора и технологии, которые могут быть использованы для управления по-

токами органического углерода и азота либо должны учитываться в этом аспекте.

Список источников

1. Гамзиков Г. П., Сулейменов С. З. Влияние биомассы растений на азотный режим серой лесной почвы и продуктивность полевых культур // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 4. С. 32–36. DOI: 10.31857/S2500262720040080. EDN: YBDCAS.
2. Кожевников Н. В., Заушинцева А. В. Проблема ускоренного почвообразования в рекультивации нарушенных земель // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. № 1-2(61). С. 26–29. EDN: TOLAXR.
3. Авдеев В. И. Этапы формирования степных ландшафтов в Евразии. 1. Общие аспекты проблемы // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2008. № 2(18). С. 38–42. EDN: MHWZRL.
4. Чимитдоржиева Г. Д. К вопросу о восстановлении плодородия дефлированных сухостепных почв (на примере модельных лабораторных опытов) // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25, № 1(78). С. 43–48. EDN: YSPVJZ.
5. Взаимодействие циклов углерода и азота в основных типах почв при длительном применении различных систем удобрения / В. Г. Сычев, Л. К. Шевцова, М. В. Беличенко, О. В. Рухович, О. И. Иванова // Проблемы агрохимии и экологии. 2018. № 4. С. 68–77. DOI: 10.26105/AE.2018.4.33.016. EDN: YRYERV.
6. Вальков В. Ф., Казеев К. Ш., Колесников С. И. Актуальные проблемы экологии и плодородия почв юга России // Юг России: экология, развитие. 2007. Т. 2, № 3. С. 90–93. EDN: KWMPJL.
7. Золотарева Е. Л., Золотарев А. А., Леонов Э. И. Эколого-экономические аспекты использования сельскохозяйственных земель в Российской Федерации // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 88–92. EDN: NWUENS.
8. Макарова Н. М. Экологические проблемы в системе управления плодородием почв в агроландшафтах // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 2(62). С. 150–153. EDN: WBMQET.
9. Зимовец Б. А. Проблемы мелиорации, плодородия и экологии почв аридной зоны // Почвоведение. 1991. № 9. С. 87–96. EDN: UBСIUX.
10. Лях Н. А., Ковалева К. Ю., Владимиров С. А. Пути повышения эффективности использования земельных и водных ресурсов // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 65-1. С. 147–150. DOI: 10.18411/lj-09-2020-33. EDN: USYYZG.
11. Паньковский Г. А. Проблема устойчивости сельскохозяйственного производства // Экономика сельского хозяйства. Реферативный журнал. 2003. № 2. С. 266. EDN: ECENSV.
12. Белая С. А. Стратегии производства аграрной продукции: мировой опыт // Экономический вестник университета. 2020. № 45. С. 7–21. DOI: 10.31470/2306-546X-2020-45-07-21. EDN: XPONZI.
13. Кузнецова Е. И., Михеев В. А., Доценко С. Г. Орошение и удобрение кормовых угодий на окультуренных почвах // Плодородие. 2012. № 2(65). С. 47–48. EDN: OWNHSP.
14. Ясониди О. Е. Оценка биологической эффективности орошения и удобрения агроценозов // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2002. № 4. С. 59–61. EDN: WTJDJH.

15. Лытов М. Н. Принципы регулирования потоков и баланса биогенных элементов на мелиорированных землях // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 3(71). С. 141–152. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-14. EDN: LSWBFJ.
16. Лаврентьева И. Н., Меркушева М. Г., Убугунов Л. Л. Оценка запасов органического углерода и потоков CO₂ в травяных экосистемах Западного Забайкалья // Почвоведение. 2017. № 4. С. 411–426. DOI: 10.7868/S0032180X17040050. EDN: YIVCTZ.
17. Моисеев Б. Н., Алябина И. О. Оценка и картографирование потоков органического углерода, поступающего в почвы основных биомов России // Почвоведение. 2002. № 6. С. 675–681. EDN: TMFKDZ.
18. Самбуу А. Д., Дапылдай А. Б., Куулар А. Н. Пул углерода в травяных экосистемах и агроценозах Тувы // Вестник КрасГАУ. 2009. № 12(39). С. 50–56. EDN: KZZQVH.
19. Чупрова В. В. Запасы и потоки углерода и азота в экосистеме зернотравяного звена севооборота // Вестник КрасГАУ. 2002. № 1. С. 89–93. EDN: ZDORNR.
20. Алферов А. А., Чернова Л. С. Потоки азота и изменение режима функционирования агроэкосистемы в посевах яровой пшеницы // Плодородие. 2021. № 6(123). С. 69–71. DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.19. EDN: PSQQTN.
21. Шевченко В. А., Лытов М. Н. Концептуальные подходы к оценке эффективности и оптимизации управления балансом биогенных элементов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2(70). С. 15–22. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-01. EDN: GSILKO.
22. Шепелев М. А., Кадырова Г. Б. Состояние баланса гумуса и биогенных элементов в агроэкосистемах ТОО «Чернышевское» Костанайской области // 3i: Intellect, Idea, Innovation – интеллект, идея, инновация. 2017. № 2-1. С. 293–300. EDN: UAHLHF.
23. Zalibekov Z. G. Arid soil formation and the problems of its studying in the south regions of Russia // Аридные экосистемы. 2005. Т. 11, № 26–27. С. 94–99. EDN: KNXXCN.
24. Мелихова Н. П., Зибаров А. А., Вронская Л. В. Продуктивность и плодородие почвы в орошаемых севооборотах Поволжья // Орошаемое земледелие. 2022. № 1. С. 25–28. DOI: 10.35809/2618-8279-2022-1-3. EDN: FJGOIJ.
25. Parton W. J. The CENTURY model // Evaluation of Soil Organic Matter Models. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996. P. 283–291. DOI: 10.1007/978-3-642-61094-3_23. (NATO ASI Series. Vol. 38).
26. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil: Description, calibration, and behavior / J. A. E. Molina, C. E. Clapp, M. Shaffer, F. Chichester, W. Larson // Soil Science Society of America Journal. 1983. Vol. 47. P. 85–91. DOI: 10.2136/sssaj1983.03615995004700010017x.
27. Надпорожская М. А., Быховец С. С., Абакумов Е. В. Применение математической модели ROMUL для оценки эмиссии CO₂ и динамики органического вещества литоземов Субантарктики // Почвоведение. 2022. № 4. С. 415–427. DOI: 10.31857/S0032180X22040128. EDN: LPVCRE.
28. Abrahamsen D., Søren P., Søren H. Daisy: An open soil-crop-atmosphere system model // Environmental Modelling & Software. 2000. Vol. 15. P. 313–330. DOI: 10.1016/S1364-8152(00)00003-7.
29. DNDC model, a model of biogeochemical processes: Research progress and applications / J. W. Guo, Y. C. Zou, L. L. Huo, X. G. Lü // Ying Yong Sheng Tai Xue Bao. 2013, Feb. Vol. 24(2). 571–80. PMID: 23705407. (In Chinese).
30. Лытов М. Н. Особенности формирования водного режима почвы при разных уровнях водообеспечения сои в условиях орошения // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2019. № 3(35). С. 31–49. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=999> (дата обращения: 15.12.2023). DOI: 10.31774/2222-1816-2019-3-31-49. EDN: EYSGOC.

31. Бородычев В. В., Лытов М. Н. Особенности применения минеральных удобрений при возделывании сои при орошении в условиях Нижнего Поволжья // Плодородие. 2015. № 1(82). С. 33–35. EDN: THJMPH.
32. Бородычев В. В., Лытов М. Н., Пахомов Д. А. Формирование оптимальной структуры агроценоза сои на мелиорированных землях Нижнего Поволжья // Плодородие. 2008. № 5(44). С. 27–28. EDN: KUCMUP.
33. Формирование бездефицитного баланса азота в почве при возделывании бобовых культур / Н. Н. Дубенок, В. В. Бородычев, М. Н. Лытов, Д. А. Пахомов // Агрохимический вестник. 2007. № 5. С. 9–11. EDN: MUKЕJ.
34. Лытов М. Н. Агроэкологическая оценка сортов и приемов возделывания орошаемой сои на повторно осваиваемых землях Волгоградского Заволжья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2(70). С. 191–200. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-22. EDN: PULLGV.
35. Ковалев Н. Г. Современные проблемы производства и использования органических удобрений // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2013. № 2(10). С. 82–101. EDN: QBIXDN.

References

1. Gamzikov G.P., Suleimenov S.Z., 2020. *Vliyanie biomassy rasteniy na azotnyy rezhim seroy lesnoy pochvy i produktivnost' polevykh kul'tur* [Influence of plant biomass on nitrogen regime of gray forest soil and productivity of field crops]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka* [Russian Agrarian Science], no. 4, pp. 32-36, DOI: 10.31857/S2500262720040080, EDN: YBDCAS. (In Russian).
2. Kozhevnikov N.V., Zaushintsenna A.V., 2015. *Problema uskorennoy pochvoobrazovaniya v rekul'tivatsii narushennykh zemel'* [Problem of accelerated soil formation in reclamation of disturbed lands]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Kemerovo State University], no. 1-2(61), pp. 26-29, EDN: TOLAXR. (In Russian).
3. Avdeev V.I., 2008. *Etapy formirovaniya stepnykh landshaftov v Yevrazii. 1. Obshchie aspekty problemy* [Stages of steppe landscapes formation in Eurasia. 1. General aspects of the problem]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bull. of Orenburg State Agrarian University], no. 2(18), pp. 38-42, EDN: MHWZRL. (In Russian).
4. Chimitdorzhieva G.D., 2019. *K voprosu o vosstanovlenii plodorodiya deflirovannykh sukhostepnykh pochv (na primere model'nykh laboratornykh opytov)* [Fertility restoration in deflated dry steppe soils on the example of model laboratory experiments]. *Aridnye ekosistemy* [Arid Eco-Systems], vol. 25, no. 1(78), pp. 43-48, EDN: YSPVJZ. (In Russian).
5. Sychev V.G., Shevtsova L.K., Belichenko M.V., Rukhovich O.V., Ivanova O.I., 2018. *Vzaimodeystvie tsiklov ugleroda i azota v osnovnykh tipakh pochv pri dlitel'nom primenении razlichnykh sistem udobreniya* [Interaction of carbon and nitrogen cycles in basic types of soils with long-term use of various fertilizer systems]. *Problemy agrokhimii i ekologii* [Agrochemistry and Ecology Problems], no. 4, pp. 68-77, DOI: 10.26105/AE.2018.4.33.016, EDN: YRYERV. (In Russian).
6. Valkov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., 2007. *Aktual'nye problemy ekologii i plodorodiya pochv yuga Rossii* [The basic problems of ecology and soil fertility in the south of Russia]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie* [South of Russia: Ecology, Development], vol. 2, no. 3, pp. 90-93, EDN: KWMPJL. (In Russian).
7. Zolotareva E.L., Zolotarev A.A., Leonov E.I., 2019. *Ekologo-ekonomicheskie aspekty ispol'zovaniya sel'skokhozyaystvennykh zemel' v Rossiyskoy Federatsii* [Ecological and economic aspects of the agricultural land use in the Russian Federation]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of Kursk State Agricultural Academy], no. 1, pp. 88-92, EDN: NWUEHC. (In Russian).

8. Makarova N.M., 2016. *Ekologicheskie problemy v sisteme upravleniya plodorodiem pochv v agrolandshaftakh* [Environmental problems in the system of soil fertility management in agricultural landscapes]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(62), pp. 150-153, EDN: WBMQET. (In Russian).

9. Zimovets B.A., 1991. *Problemy melioratsii, plodorodiya i ekologii pochv aridnoy zony* [Problems of reclamation, fertility and ecology of soils in the arid zone]. *Pochvovedenie* [Agriculture], no. 9, pp. 87-96, EDN: UBCIUX. (In Russian).

10. Lyakh N.A., Kovaleva K.Yu., Vladimirov S.A., 2020. *Puti povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya zemel'nykh i vodnykh resursov* [Ways to increase the efficiency of using land and water resources]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in Development of Science and Education], no. 65-1, pp. 147-150, DOI: 10.18411/lj-09-2020-33, EDN: USYYZG. (In Russian).

11. Pankovsky G.A., 2003. *Problema ustoychivosti sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva* [The problem of sustainability of agricultural production]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva. Referativnyy zhurnal* [Economics of Agriculture of Russia. Review Journal], no. 2, p. 266, EDN: ECENSV. (In Russian).

12. Belaya S.A., 2020. *Strategii proizvodstva agrarnoy produktsii: mirovoy opyt* [Agricultural production strategies: World experience]. *Ekonomicheskiy vestnik universiteta* [Economic Bulletin of the University], no. 45, pp. 7-21, DOI: 10.31470/2306-546X-2020-45-07-21, EDN: XPONZI. (In Russian).

13. Kuznetsova E.I., Mikheev V.A., Dotsenko S.G., 2012. *Oroshenie i udobrenie kormovykh ugodiy na okul'turenykh pochvakh* [Irrigation and fertilization of forage lands on cultivated soils]. *Plodorodie* [Fertility], no. 2(65), pp. 47-48, EDN: OWNHSP. (In Russian).

14. Yasonidi O.E., 2002. *Otsenka biologicheskoy effektivnosti orosheniya i udobreniya agrotsenozov* [Evaluation of biological efficiency of irrigation and fertilization of agrocenoses]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences], no. 4, pp. 59-61, EDN: WTJDJH. (In Russian).

15. Lytov M.N., 2023. *Printsipy regulirovaniya potokov i balansa biogennykh elementov na meliorirovannykh zemlyakh* [Principles of regulation of flows and balance of nutrients on reclaimed lands]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bull. of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 3(71), pp. 141-152, DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-14, EDN: LSWBFJ. (In Russian).

16. Lavrentyeva I.N., Merkusheva M.G., Ubugunov L.L., 2017. *Otsenka zapasov organicheskogo ugleroda i potokov CO₂ v travyanykh ekosistemakh Zapadnogo Zabaykal'ya* [Evaluation of organic carbon reserves and CO₂ fluxes in grass ecosystems of Western Transbaikalia]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], no. 4, pp. 411-426, DOI: 10.7868/S0032180X17040050, EDN: YIVCTZ. (In Russian).

17. Moiseev B.N., Alyabina I.O., 2002. *Otsenka i kartografirovaniye potokov organicheskogo ugleroda, postupayushchego v pochvy osnovnykh biomov Rossii* [Assessment and mapping of organic carbon flows entering the soils of the main biomes of Russia]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], no. 6, pp. 675-681, EDN: TMFKDZ. (In Russian).

18. Sambuu A.D., Dapylday A.B., Kuular A.N., 2009. *Pul ugleroda v travyanykh ekosistemakh i agrotsenozakh Tuvy* [Carbon pool in grass ecosystems and agrocenoses of Tuva]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], no. 12(39), pp. 50-56, EDN: KZZQVH. (In Russian).

19. Chuprova V.V., 2002. *Zapasy i potoki ugleroda i azota v ekosisteme zernotra-vyanogo zvena sevooborota* [Carbon and nitrogen flow stocks in ecosystem of the grain-grass link of crop rotation]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], no. 1, pp. 89-93, EDN: ZDORNR. (In Russian).

20. Alferov A.A., Chernova L.S., 2021. *Potoki azota i izmenenie rezhima funktsionirovaniya agroekosistemy v posevakh yarovoy pshenitsy* [Nitrogen flows and changes in the functioning regime of the agroecosystem in spring wheat crops]. *Plodorodie* [Fertility], no. 6(123), pp. 69-71, DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.19, EDN: PSQQTN. (In Russian).

21. Shevchenko V.A., Lytov M.N., 2023. *Kontseptual'nye podkhody k otsenke effektivnosti i optimizatsii upravleniya balansom biogennykh elementov* [Conceptual approaches to assessing the effectiveness and optimizing the management of the balance of nutrients]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee profesional'noe obrazovanie* [Bull. of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 2(70), pp. 15-22, DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-01, EDN: GSILKO. (In Russian).

22. Shepelev M.A., Kadyrova G.B., 2017. *Sostoyanie balansa gumusa i biogennykh elementov v agroekosistemakh TOO "Chernyshevskoe" Kostanayskoy oblasti* [Status of humus and nutrients balance in agroecosystems of Chernyshevskoe LLP, Kostanay region]. *3i: Intellect, Idea, Innovation – intellekt, ideya, innovatsiya* [3I: Intellect, Idea, Innovation], no. 2-1, pp. 293-300, EDN: UAHLHF. (In Russian).

23. Zalibekov Z.G., 2005. Arid soil formation and the problems of its studying in the south regions of Russia. *Aridnye ekosistemy* [Arid Ecosystems], vol. 11, no. 26-27, pp. 94-99, EDN: KNXXCN. (In Russian).

24. Melikhova N.P., Zibarov A.A., Vronskaya L.V., 2022. *Produktivnost' i plodorodie pochvy v oroshaemykh sevooborotakh Povolzh'ya* [Soil productivity and fertility in irrigated crop rotations in the Volga region]. *Oroshaemoe zemledelie* [Irrigated Agriculture], no. 1, pp. 25-28, DOI: 10.35809/2618-8279-2022-1-3, EDN: FJGOIJ. (In Russian).

25. Parton W.J., 1996. The CENTURY model. Evaluation of Soil Organic Matter Models. Berlin, Heidelberg, Springer, pp. 283-291, DOI: 10.1007/978-3-642-61094-3_23. (NATO ASI Series, vol. 38).

26. Molina J.A.E., Clapp C.E., Shaffer M., Chichester F., Larson W., 1983. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil: Description, calibration, and behavior. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 47, pp. 85-91, DOI: 10.2136/sssaj1983.03615995004700010017x.

27. Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Abakumov E.V., 2022. *Primenenie matematicheskoy modeli ROMUL dlya otsenki emissii CO₂ i dinamiki organicheskogo veshchestva litozemov Subantarktiki* [Application of the ROMUL mathematical model for estimation of CO₂ emission and dynamics of organic matter in the Subantarctic lithozems]. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 4, pp. 415-427, DOI: 10.31857/S0032180X22040128, EDN: LPVCRE. (In Russian).

28. Abrahamsen D., Søren P., Søren H., 2000. Daisy: An open soil-crop-atmosphere system model. *Environmental Modelling & Software*, vol. 15, pp. 313-330, DOI: 10.1016/S1364-8152(00)00003-7.

29. Guo J.W., Zou Y.C., Huo L.L., Lü X.G., 2013. DNDC model, a model of biogeochemical processes: Research progress and applications. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao* [The Journal of Applied Ecology], Feb., vol. 24(2), 571-80, PMID: 23705407. (In Chinese).

30. Lytov M.N., 2019. [Features of the formation of soil water regime at different levels of water supply to soybeans under irrigation]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 3(35), pp. 31-49, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=999> [accessed 15.12.2023], DOI: 10.31774/2222-1816-2019-3-31-49, EDN: EYSGOC. (In Russian).

31. Borodychev V.V., Lytov M.N., 2015. *Osobennosti primeneniya mineral'nykh udobreniy pri vozdeleyvanii soi pri oroshenii v usloviyakh Nizhnego Povolzh'ya* [Application features of mineral fertilizers when cultivating soybeans under irrigation in the Lower Volga region]. *Plodorodie* [Fertility], no. 1(82), pp. 33-35, EDN: THJMHP. (In Russian).

32. Borodychev V.V., Lytov M.N., Pakhomov D.A., 2008. *Formirovanie optimal'noy struktury agrotsenoza soi na meliorirovannykh zemlyakh Nizhnego Povolzh'ya* [Formation of optimal of soybean agrocenosis structure on reclaimed lands of the Lower Volga region]. *Plodorodie* [Fertility], no. 5(44), pp. 27-28, EDN: KUCMUP. (In Russian).

33. Dubenok N.N., Borodychev V.V., Lytov M.N., Pakhomov D.A., 2007. *Formirovanie bezdiftsitnogo balansa azota v pochve pri vozdelevanii bobovykh kul'tur* [Formation of a deficit-free nitrogen balance in soil during the cultivation of legumes]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], no. 5, pp. 9-11, EDN: MUKJEJ. (In Russian).

34. Lytov M.N., 2023. *Agroekologicheskaya otsenka sortov i priemov vozdelevaniya oroshaemoy soi na povtorno osvvaivamykh zemlyakh Volgogradskogo Zavolzh'ya* [Agroecological assessment of varieties and methods of cultivation of irrigated soybeans on re-developed lands of the Volgograd Trans-Volga region]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bull. of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 2(70), pp. 191-200, DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-22, EDN: PULLGV. (In Russian).

35. Kovalev N.G., 2013. *Sovremennye problemy proizvodstva i ispol'zovaniya organicheskikh udobreniy* [Modern problems of production and use of organic fertilizers]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva* [Bull. of All-Russian Scientific Research Institute of Livestock Mechanization], no. 2(10), pp. 82-101, EDN: QBIXDN. (In Russian).

Информация об авторе

М. Н. Лытов – ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Волгоград, Российская Федерация, LytovMN@yandex.ru, AuthorID: 372113, ORCID ID: 0000-0003-2743-9825.

Information about the author

M. N. Lytov – Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Volgograd, Russian Federation, LytovMN@yandex.ru, AuthorID: 372113, ORCID ID: 0000-0003-2743-9825.

*Автор несет ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.
The author is responsible for violation of scientific publication ethics.*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 25.12.2023; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 08.02.2024.
The article was submitted 25.12.2023; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 08.02.2024.*