



## Моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы

Н. И. Джабборов<sup>1</sup>, А. П. Савельев<sup>2</sup>✉, А. В. Добринов<sup>1</sup>,  
А. М. Захаров<sup>1</sup>, И. И. Жуйков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Мордовский государственный университет (г. Саранск, Российская Федерация)*

✉ [tbsap52@mail.ru](mailto:tbsap52@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Предотвращение загрязнения окружающей среды, включая водные объекты, биогенными элементами (азотом и фосфором) при их выносе с сельскохозяйственных угодий с возможными стоками является актуальной проблемой современной агроинженерной науки, которая требует своевременного решения. Исследованиями установлено, что вынос биогенных элементов происходит в результате геохимических процессов, внесения на поле удобрений и иных факторов. В этой связи математическое моделирование процесса выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий и возможного их попадания в водные объекты является актуальной задачей агроинженерных исследований.

**Цель исследования.** Смоделировать и спрогнозировать процесс возможного выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в водоемы.

**Материалы и методы.** При проведении исследования применялись известные методы моделирования; методика расчета выноса биогенных веществ в водоемы с сельскохозяйственных угодий (с опорой на минимальный объем исходной информации) для прогноза эвтрофирования водных объектов; агрохимические методики, учитывающие структуру и размеры полевых и сельскохозяйственных площадей, урожайность культур, вынос биогенных элементов с урожаем.

**Результаты исследования.** На основе анализа литературы и экспертной оценки был обобщен перечень наиболее значимых показателей, влияющих на процесс выноса азота и фосфора. Разработаны математические модели для определения и прогнозирования поступления биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в водные объекты. Установлены весовые показатели, влияющие на количество поступления биогенных элементов, а именно количество внесенных удобрений, объем влаги, влагоемкость почвы, площадь поля, глубина обработки и др. Приведен пример расчета количества поступления биогенных элементов в водные объекты при интенсивности выпадения осадков 50 мм в течение часа.

© Джабборов Н. И., Савельев А. П., Добринов А. В., Захаров А. М., Жуйков И. И., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

*Обсуждение и заключение.* Сущность предложенных математических моделей сводится к синтезу многочисленных показателей в сложном процессе выноса биогенных элементов и их влияния на качество воды. Предложенные математические модели позволят прогнозировать вынос биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий, разрабатывать и внедрять технико-технологические решения, предотвращающие загрязнение окружающей среды.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственные угодья, обработка почвы, биогенные элементы, водные объекты, агрофизические свойства почвы

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почв / Н. И. Джабборов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 101–114. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.101-114>

Original article

## Modeling and Forecasting the Removal of Biogenic Elements from Agricultural Lands Depending on the Soil Agrophysical Properties

N. I. Jabborov<sup>a</sup>, A. P. Savelyev<sup>b</sup>✉, A. V. Dobrinov<sup>a</sup>,  
A. M. Zakharov<sup>a</sup>, I. I. Zhuikov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Saint Petersburg, Russian Federation)

<sup>b</sup> National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

✉ [tbsap52@mail.ru](mailto:tbsap52@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Environmental pollution prevention, including prevention of water bodies, with nutrients (nitrogen and phosphorus) when they are removed from agricultural lands with possible runoff is a topical problem that requires a timely solution. The studies have found that the removal of nutrients is a result of geochemical processes, fertilization, and other factors. In this regard, mathematical modeling of the process of removal of nutrients from agricultural lands and their possible entry into water bodies is an urgent task.

**Aim of the Study.** The study is aimed at modeling and predicting the process of possible removal of nutrients from agricultural lands to water bodies.

**Materials and Methods.** When conducting the study, there were used well-known modeling methods. They are the methods for calculating the removal of nutrients from agricultural objects into water bodies, based on the minimum amount of initial information for predicting the eutrophication of water bodies and agrochemical methods taking into account the structure and size of field and agricultural areas, crop yields, and removal nutrients with the harvest.

**Results.** Based on an analysis of the literature and expert judgment, a list of the most significant indicators influencing the process of nitrogen and phosphorus removal was justified. There have been developed mathematical models to determine and predict the input of nutrients from agricultural lands to water bodies. There have been found significant indicators influencing the amount of input of nutrients, such as the amount of applied fertilizers, the volume of moisture, soil water capacity, field area, depth of

cultivation, etc. There is given an example of calculating the amount of input of nutrients into water bodies with a rainfall intensity of 50 mm per hour.

*Discussion and Conclusion.* The essence of the proposed mathematical models comes down to the synthesis of numerous indicators in the complex process of removal of nutrients and their impact on water quality. The proposed mathematical models make it possible to predict the removal of nutrients from agricultural lands and to develop and implement technical and technological solutions to prevent environmental pollution.

**Keywords:** agricultural land, tillage, biogenic elements, water bodies, soil agrophysical properties

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Jabborov N.I., Savelyev A.P., Dobrinov A.V., Zakharov A.M., Zhuikov I.I. Modeling and Forecasting the Removal of Biogenic Elements from Agricultural Lands Depending on the Soil Agrophysical Properties. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):101–114. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.101-114>

## Введение

Снижение выбросов азота и фосфора неразрывно связано с разработкой и освоением методов и средств определения и оценки количества поступления данных биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в водные объекты. Основными источниками выноса загрязняющих веществ являются пашни, сенокосы, пастбища, залежи, земли, занятые многолетними насаждениями, фермы и коммунально-бытовые отходы из населенных пунктов.

Вопросы выноса биогенных элементов из животноводческих ферм и комплексов, а также проблема рационального и экологически безопасного размещения ферм достаточно хорошо изучены в работах отечественных ученых<sup>1</sup>. Ими подробно рассмотрены процессы формирования и динамики биогенной нагрузки на водные объекты, обоснованы подходы к изучению проблемы. По результатам исследований учеными разработаны методики оценки биогенной нагрузки, сформировавшейся под влиянием природных и антропогенных факторов, практические рекомендации по оптимальному проектированию животноводческих ферм и комплексов, систем мониторинга и управления по удалению, хранению и подготовке к использованию навоза.

Существующие классические методики в целом позволяют определить утечку азота и фосфора с площадок складирования минеральных и органических удобрений и по статистической информации для каждого административного района водосбора установить поголовье животных, рассчитать выход навоза, содержание и выход азота и фосфора с отходами, рассчитать вынос биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в гидрографическую сеть с учетом экспликации угодий и урожайности сельскохозяйственных культур.

<sup>1</sup> Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. РД-АПК 1.10.15.02-08 / Минсельхоз РФ. М., 2008. 93 с. ; Рекомендации по обоснованию экологически безопасного размещения и функционирования животноводческих и птицеводческих предприятий / А. Ю. Брюханов [и др.]. СПб. : ИАЭП, 2015. 48 с. ; Бойченко З. А., Чуян Г. А., Тур О. П. Прогнозирование содержания биогенных элементов в стоке с сельскохозяйственных угодий // *Агрехимия*. 1985. № 5. С. 73–79 ; Хрисанов Н. И., Осипов Г. К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 276 с.

Возросший повсеместный интерес к обеспечению экологической безопасности технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции требует совершенствования существующих методов поиска новых подходов и технико-технологических решений, обеспечивающих снижение выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий.

Цель исследования – моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы.

### **Обзор литературы**

Одной из актуальных проблем современной науки является обеспечение экологической безопасности технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции. Во всех зонах земледелия наибольшую значимость приобрели вопросы снижения или предотвращения выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий. Вместе с тем учеными более подробно изучены вопросы выноса азота, фосфора и калия растениями и их содержание в культурных и сорных растениях [1–3].

Учеными исследованы особенности влияния режимов минерального питания на урожай и вынос элементов питания маточной сахарной свеклы, выращиваемой методом штеклингов на орошении в зоне неустойчивого увлажнения [4]. Представлены результаты изучения влияния минеральных удобрений, последствие навоза и совместного их влияния на урожайность и качество зерна озимой пшеницы [5]. Описаны результаты опыта по влиянию различных доз минерального питания на динамику содержания общего азота, фосфора и калия в пахотном слое (0–20 см) серой лесной тяжелосуглинистой почвы в условиях юга Центрального Нечерноземья [6]. Выполнена оценка массы переносимых трансграничными реками бассейна Западной Двины (рр. Западная Двина, Каспля, Свольня, Усвяча, Уща) валового азота и валового фосфора на территорию Республики Беларусь [7]. Выявлено, что межгодовые изменения массы выноса определяются преимущественно объемом речного стока. Это позволило оценить вынос валового азота и фосфора в годы различной водности с использованием данных о средних за 2011–2016 гг. концентрациях биогенных элементов.

Авторами работ дана общая оценка поступления в окружающую среду отходов животноводческого производства и внесения органических и минеральных удобрений на исследуемой территории [8]. Выявлено, что в пунктах отбора проб воды складывается умеренно напряженная экологическая ситуация в связи с периодическим сверхнормативным поступлением биогенных загрязняющих веществ в исследуемые водные объекты. Разработана методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты [9], которая призвана решить первостепенную задачу определения роли различных источников (таких как поверхностный сток, эрозия, грунтовые, почвенные, дренажные воды, осадение из атмосферы) в процессе поступления биогенных веществ с российской части водосборного бассейна Балтийского моря. Дана оценка поступления азота и фосфора в водные объекты с сельскохозяйственных угодий [10] в пределах частного водосборного бассейна реки Нарвы в период с 2006 по 2018 г. Дан анализ

причины загрязнения Нытвенского водохранилища биогенными веществами, приводящими в условиях замедленного водообмена к его эвтрофикации. Авторами научных работ рассмотрены основные источники загрязнения водных экосистем [11], приведены примеры факторов негативного влияния на водные объекты. Установлено, что рассредоточенный сток с сельскохозяйственных территорий оказывает негативное воздействие на поверхностные водные объекты, увеличивая содержание в их водах биогенных веществ<sup>2</sup>. При изучении гидроэкологического состояния водных экосистем установлено [12], что увеличение объемов хозяйственной деятельности близ водных объектов обуславливает ухудшение их гидрохимических характеристик, изменение которых можно рассматривать в качестве основного индикатора негативного влияния на водную среду. В литературных источниках приведены результаты мониторингового исследования влияния сельскохозяйственного использования на содержание общего углерода, азота и фосфора в верхних горизонтах почв разного генезиса [13]. Выявлено, что проблема эвтрофирования водных объектов является одной из наиболее серьезных как на глобальном, так и на региональном уровнях [14]. Ключевым фактором эвтрофикации в Беларуси, по многолетним данным мониторинга, является содержание в воде соединений фосфора. В работе Бутько А. А. и Родькина О. И. [15] представлены результаты мониторинга гидрохимического состава вод малой реки Приморской, дана характеристика качества воды, рассчитан вынос минеральных форм азота и фосфора со стоком реки в Калининградский залив Балтийского моря в 2021–2022 гг. Дана оценка возможного снижения выноса биогенных элементов с водосборов притоков Куйбышевского водохранилища за счет внедрения наилучших доступных технологий сельскохозяйственного производства<sup>3</sup>. Выявлено, что количество внесенных в почву азота и фосфора в составе минеральных и органических удобрений для большинства административных районов изучаемого региона ниже потребности растительных культур в биогенных элементах. Это приводит к постепенному обеднению почв питательными веществами и снижению риска миграции этих элементов в водные объекты [16].

Учеными предложен макрорегиональный метод для интегрированного управления и контроля выбросов азота и фосфора в результате антропогенного воздействия на окружающую среду, раскрывающий перспективы снижения биогенной нагрузки на водные объекты [17].

Рассмотрены методы и средства извлечения азота и фосфора из сточных вод [18], предложены эффективные способы удаления питательных веществ из сточных вод [19], методы биологического удаления азота из сточных вод [20].

На основе анализа литературных источников и экспертной оценки в качестве основных и наиболее значимых показателей оценки выноса биогенных элементов

<sup>2</sup> Иванченкова О. А., Калашникова О. А. Источники антропогенного воздействия на водные экосистемы // Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная : мат-лы X Междунар. науч.-практ. конф. (29 апреля 2021 г., г. Брянск). Брянск : Изд-во БГИТУ, 2021. С. 211–215. EDN: PHNNYG

<sup>3</sup> Ширчкова А. Н., Цветкова Н. Н. Вынос биогенных веществ со стоком реки Приморской в Калининградский залив // Балтийский морской форум : мат-лы X Междунар. Балтийского морского форума. Т. 3. (26 сентября–01 октября 2022 г., г. Калининград). Калининград, 2022. С. 248–255. EDN: CNWMTL

в водные объекты были установлены: количество внесенных удобрений (азота и фосфора) в почву при возделывании сельскохозяйственных культур, объем влаги, полная влагоемкость почвы, площадь поля, глубина обработки.

### Материалы и методы

При проведении исследований использовались известные методы моделирования и методика расчета выноса биогенных веществ в водоемы с сельскохозяйственных объектов (с опорой на имеющийся минимально необходимый объем исходной информации) для прогноза эвтрофикации водных объектов, а также агрохимические методики, учитывающие структуру и размеры полевых и сельскохозяйственных площадей, урожайность культур, вынос биогенных элементов с урожаем.

Расчеты по определению возможного количества выноса биогенных элементов с пашни площадью 1 га при выпадении осадков 50 мм (или 500 м<sup>3</sup>/га) в час и различных значениях глубины обработки почвы (5, 20 и 30 см) произведены на основе статистических данных, собранных в Северо-Западной части России.

Исследования проводились в четыре этапа:

- первый включал в себя анализ исследований по вопросу выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий;
- на втором этапе исследований были установлены наиболее весомые показатели, влияющие на количество выноса азота и фосфора;
- третий предусматривал моделирование процесса выноса биогенных элементов;
- на четвертом этапе на основе статистических данных произведены расчеты по выносу биогенных элементов при фиксированном значении выпадении осадков при различных значениях глубины обработки почвы.

### Результаты исследования

*Моделирование процесса поступления биогенных элементов.* По результатам экспертной оценки и анализа литературы были установлены наиболее весомые показатели, влияющие на вынос азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий, такие как количество внесенных удобрений, объем влаги, влагоемкость почвы, площадь поля, глубина обработки и др.

На рисунке 1 представлена схема, показывающая взаимосвязь выноса азота и фосфора с другими зависящими от него показателями.

Для количественной оценки и сопоставления базового (допустимого) значения выноса биогенных элементов с текущим значением в качестве критерия был выбран минимум количества поступления азота и фосфора в водные объекты  $A_{NP}^l \rightarrow \min$ .

Исходя из проведенного анализа, можно говорить о том, что количество выноса азота и фосфора существенно зависит от дозы внесения удобрений, объема влаги, влагоемкости, глубины обработки, плотности и пористости почвы, площади поля и может быть выражено формулой:

$$A_{NP}^l = f(N_{NP}, Q_B, W^n, F, h), \quad (1)$$

где  $N_{NP}$  – количество внесенных удобрений (азота и фосфора), кг/га;  $Q_B$  – объем влаги, м<sup>3</sup>;  $W^n$  – полная влагоемкость почвы, %;  $F$  – площадь поля, м<sup>2</sup>;  $h$  – глубина обработки, см.



Р и с. 1. Схема взаимосвязи критерия минимума количества поступления биогенных элементов в водные объекты с другими зависящими от него показателями

F i g. 1. Diagram of the relationship between the criterion for the minimum amount of nutrients entering water bodies and other indicators that depend on it

Количество биогенных элементов с 1 га сельскохозяйственных угодий, которое может поступить в водные объекты, можно рассчитать по формуле:

$$A'_{NP} = Q_{\Pi} \cdot \psi_{NP}, \text{ кг}, \quad (2)$$

где  $Q_{\Pi}$  – величина потери воды на сброс,  $\text{м}^3$ ;  $\psi_{NP}$  – содержание (концентрация) азота и фосфора в стоке<sup>4</sup>,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Величину потери воды на сброс  $Q_{\Pi}$  можно определить из выражения:

$$Q_{\Pi} = Q_v - Q_{уп}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

где  $Q_v$  – количество воды, поданной на 1 га (атмосферные осадки или оросительные воды),  $\text{м}^3$ ;  $Q_{уп}$  – количество влаги (воды), которое может удержать почва,  $\text{м}^3$ .

Количество влаги  $Q_{уп}$ , которое может удержать почва, определяется из выражения:

$$Q_{уп} = 10^{-4} \cdot W^n \cdot F \cdot h, \text{ м}^3, \quad (4)$$

где  $W^n$  – полная влагоемкость почвы, %;  $F$  – площадь поля,  $\text{м}^2$ ;  $h$  – глубина обработки почвы, см.

<sup>4</sup> Нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [Электронный ресурс] : Приложение к приказу Министерства сельского хозяйства РФ от 13 дек. 2016 г. № 552. URL: <https://base.garant.ru/71586774/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/#friends> (дата обращения: 06.10.2023).

Значение содержание азота и фосфора можно определить по формуле:

$$\Psi_{NP} = \left[ \begin{array}{l} (N_N - V_N^{пв} - V_N^{раст} - V_N^{исп} - V_N^{алс}) + \\ + (N_P - V_P^{пв} - V_P^{раст}) \end{array} \right] \cdot f_a \cdot Q_b^{-1}, \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

где  $N_N$  – количество внесенных на 1 га азотных удобрений, кг;  $N_P$  – количество внесенных на 1 га фосфорных удобрений, кг;  $V_N^{пв}$  – вынос азота с 1 га в подпочвенные горизонты, кг;  $V_N^{раст}$  – вынос азота с 1 га растениями, кг;  $V_N^{исп}$  – улетучивание азота в виде аммиака и закиси азота, которое зависит от температуры и влажности почвы, кг. Потери азота из-за улетучивания в среднем составляют 15 % от внесенного<sup>5</sup> его количества;  $V_N^{алс}$  – потери азота с 1 га в процессе адсорбции, кг;  $V_P^{пв}$  – вынос фосфора с 1 га в подпочвенные горизонты, кг;  $V_P^{раст}$  – вынос фосфора с 1 га растениями, кг;  $f_a$  – коэффициент<sup>6</sup>, учитывающий влияние агротехнического фона на концентрацию биогенных веществ в стоке.

Полная влагоемкость соответствует состоянию полной насыщенности почвы водой, когда ею заполнены все поры. Ее величина зависит от пористости почвы и рассчитывается по формуле<sup>7</sup>:

$$W^n = \frac{P}{\rho_n}, \quad (6)$$

где  $W^n$  – полная влагоемкость (в % от сухой почвы);  $P$  – пористость (в % от объема почвы);  $\rho_n$  – плотность почвы (г/см<sup>3</sup>).

Полная влагоемкость почвы<sup>8</sup> обычно колеблется в пределах 40–50 %.

В нормативных документах предельно допустимая концентрация<sup>9</sup> азота и фосфора в водах водных объектов рыбохозяйственного значения составляет 1 мг/дм<sup>3</sup> или (0,001 кг/м<sup>3</sup>), что следует учитывать при определении показателя  $A'_{NP}$  по выражению (2).

Скорость передвижения жидкости сквозь толщу массива почвы определяется по формуле<sup>10</sup>:

$$V_{об} = K_\phi \cdot S \cdot gradl = 10^{-2} \cdot K_n \cdot \rho_w \cdot S \cdot \frac{gradl}{\eta}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент фильтрации;  $K_n$  – коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup> или см<sup>2</sup>; (коэффициентом проницаемости называют физическую величину, которая характеризует способность вещества пропускать жидкости и газы; при неизменных

<sup>5</sup> Ягодин Б. А., Жуков Ю. П., Кобзаренко В. И. Агрехимия / Под ред. Б. А. Ягодина. М. : Колос, 2002. 584 с.

<sup>6</sup> Вынос биогенных элементов с водосборов малых рек республики Татарстан / О. Н. Урбанова [и др.] // Вестник Удмуртского университета. 2015. Т. 25, вып. 4. С. 45–52.

<sup>7</sup> Руководство по определению агроградации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов «ВНИИГМИ-МЦД». Обнинск, 2023. 121 с.

<sup>8</sup> Исаенко В. А., Горбунов М. Ю. Водно-физические свойства почвы и их изменение при различных технологиях обработки почвы в севообороте // Вестник Курганской ГСХА. 2012. № 4. С. 16–19.

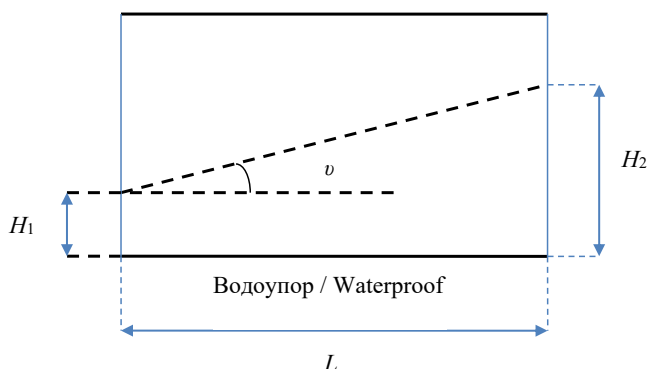
<sup>9</sup> Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.1315-03 / Минздрав России. М., 2003. 214 с.

<sup>10</sup> ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации : дата введения 2017-05-01. М. : Стандартиформ, 2016. 19 с.



вязкости и градиенте давления с ростом коэффициента проницаемости скорость фильтрации увеличивается);  $S$  – площадь поперечного сечения грунта, через который проходит вода;  $gradl$  – градиент напора;  $\rho_w$  – плотность воды, г/см<sup>3</sup>;  $\eta$  – вязкость воды.

Гидравлический градиент  $i$  – напорный градиент – безразмерная величина потерь напора на единице длины пути движения жидкости (рис. 2). Отражает степень сопротивления среды при движении воды. В динамике подземных вод гидравлический градиент (пьезометрический уклон) пропорционален скорости фильтрации и в зависимости от геологического строения и состава пород изменяется в основном от сотых до тысячных долей единицы.



Р и с. 2. Схема определения гидравлического градиента<sup>11</sup>  
F i g. 2. Scheme for determining the hydraulic gradient<sup>11</sup>

Скорость движения воды зависит от уклона поверхности поля. Значение гидравлического градиента  $i$  равно отношению потери напора  $H = H_2 - H_1$  к длине пути фильтрации  $L$  и выражается<sup>11</sup>:

$$i = \operatorname{tg} v = \frac{H_2 - H_1}{L} = \frac{H}{L}. \quad (8)$$

Время, требуемое для выноса из определенной площади азота и фосфора, можно рассчитать по формуле:

$$t_{NP}^{\text{вын}} = \frac{(3600 \cdot A'_{NP} \cdot h \cdot F)}{(V_{06} \cdot Q_B \cdot \rho_w \cdot \omega_k)}, \quad (9)$$

где  $A'_{NP}$  – количество азота и фосфора, которое может поступить в водные объекты, кг/га;  $F$  – площадь поля, га;  $h$  – глубина обработки почвы, см;  $V_{06}$  – скорость передвижения жидкости сквозь толщу массива почвы, см/с.;  $Q_B$  – объем влаги, м<sup>3</sup>;  $\rho_w$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega_k$  – концентрация  $NP$  в жидкости.

Необходимо отметить, что для полного выноса азота и фосфора требуется, чтобы  $W'' \geq 2Q_B$ .

<sup>11</sup> Леонтьев Н. Е. Основы теории фильтрации : учеб. пособие. М. : Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.

Предложенная авторами данной статьи математическая модель (2) и ее составляющие (3), (4) и (5) являются результатом дальнейшего совершенствования моделирования сложного процесса выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий. Предложенная математическая модель, по сравнению с используемыми в научных кругах моделями, описывает процесс с учетом площади сельскохозяйственных угодий, глубины обработки, пористости, влагоемкости и других агрофизических свойств почвы.

С использованием выражений (1)–(9) были произведены расчёты по определению возможного количества выноса биогенных элементов с пашни площадью 1 га при выпадении осадков 50 мм (или 500 м<sup>3</sup>/га) за час и различных значениях глубины обработки почвы – 5, 20 и 30 см.

При расчетах приняты начальные условия: переуплотненный слой почвы находится ниже глубины ее обработки, содержание азота в почве – 30 кг/га, фосфора – 120 кг/га, общая концентрация азота и фосфора в 1 м<sup>3</sup> воды соответствует 0,21 кг.

### Обсуждение и заключение

Разработана математическая модель для определения и прогнозирования выноса биогенных элементов в зависимости от агрофизических свойств почвы. Сущность предложенной математической модели сводится к синтезу многочисленных показателей и их взаимодействия в сложном процессе оценки снижения негативного влияния биогенных элементов.

Результаты расчетов, соответствующих выпадению осадков 50 мм/ч (500 м<sup>3</sup>/га), показали, что при глубине обработки  $h \geq 13,7$  см почва полностью может удерживать влагу, при этом не происходит ее сток за пределы поля. Отсутствует вынос биогенных элементов с поля, то есть  $A_{Np}^l = 0$ .

При глубине обработки  $h < 13,7$  см количество накопившейся воды в почве превышает полную ее влагоемкость, и происходит сток излишней влаги с поля. Чем меньше глубина обработки, тем больше будет величина стока излишней влаги, в которой содержатся биогенные элементы. При этом концентрация биогенных элементов в стоке будет больше, если удобрения внесены на поверхность или незначительную глубину. При глубоком внутривпочвенном внесении удобрений их концентрация будет снижаться.

При глубине обработки  $h = 10$  см объем излишней влаги, которая стекает с поля, составляет 136,0 м<sup>3</sup>. В этом случае количество биогенных элементов, которое может быть вынесено с водой, составит  $A_{Np}^l \leq 28,5$  кг с 1 га.

При обработке почвы на глубине всего  $h = 5$  см с поля может стекать 426,5 м<sup>3</sup> излишней влаги, что приводит к выносу биогенных элементов до  $A_{Np}^l \leq 89,5$  кг с 1 га.

По значениям  $A_{Np}^l$  можно судить об уровне экологической опасности выноса биогенных элементов с поля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астарханов И. Р., Астарханова Т. С., Алибалаев Д. А. Влияние органических удобрений на вынос питательных элементов растениями картофеля и содержание питательных элементов в растениях // Известия Дагестанского ГАУ. 2022. № 4 (16). С. 23–28. EDN: BGFCC

2. Плотников А. М., Созинов А. В. Баланс элементов питания в севообороте при использовании сапропеля, извести, азотно-фосфорного удобрения // Проблемы агрохимии и экологии. 2022. № 3–4. С. 26–31. EDN: [BSAYPK](#)
3. Тедесева В. В., Абаев А. А., Тавказахов С. А. Вынос элементов минерального питания сорняками на посевах сои // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 97–8. С. 94–97. <https://doi.org/10.18411/trnio-05-2023-455>
4. Применение удобрений и вынос элементов питания маточной сахарной свеклой летних посевов на орошении / А. В. Логвинов [и др.] // Сахарная свекла. 2022. № 10. С. 20–24. EDN: [DCCYFG](#)
5. Морозова Т. С., Лицуков С. Д., Ширяев А. В. Содержание и вынос элементов питания растениями озимой пшеницы в зависимости от применения удобрений // Вестник аграрной науки. 2021. № 2 (89). С. 40–49. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-i-vynos-elementov-pitaniya-rastenyami-ozimoy-pshenitsy-v-zavisimosti-ot-primeneniya-udobreniy/viewer> (дата обращения: 06.10.2023).
6. Артюхова О. А., Гладышева О. В., Свирина В. А. Вынос питательных элементов урожаем ярового ячменя в зависимости от уровня минерального питания // Плодородие. 2021. № 4 (121). С. 6–10. EDN: [ADXEBP](#)
7. Оценка и прогноз выноса биогенных веществ с российской части бассейна реки Западная Двина на территорию республики Беларусь / В. Ю. Георгиевский [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86, № 2. С. 243–254. <https://doi.org/10.31857/S2587556622020042>
8. Биогенное загрязнение водных объектов в сельскохозяйственных районах Белгородской области / А. Г. Корнилов [и др.] // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47, № 1. С. 76–87. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87>
9. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты / А. Ю. Брюханов [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175–183. EDN: [XAGHJT](#)
10. Задонская О. В., Обломкова Н. С., Брюханов А. Ю. Сравнительный анализ применения различных методов оценки поступления азота и фосфора от сельского хозяйства в бассейне реки Нарвы // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 1 (110). С. 142–155. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-primeneniya-razlichnyh-metodov-otsenki-postupleniya-azota-i-fosfora-ot-selskogo-hozyaystva-v-basseyne-reki-narvy/viewer> (дата обращения: 06.10.2023).
11. Ракутин М. Ю., Капустин Т. Н. Подход к оценке загрязнения малоизученных водных объектов биогенными элементами (на примере Нытвенского пруда пермского края) // Астраханский вестник экологического образования. 2020. № 5 (59). С. 162–172. EDN: [LJIACI](#)
12. Оценка неконтролируемого стока биогенных веществ с водосборных территорий малых водотоков Среднего Урала, включенных в сельскохозяйственное использование / Е. В. Федорова [и др.] // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 1. С. 68–86. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nekontroliruemogo-stoka-biogennyh-veschestv-s-vodosbornykh-territoriy-malykh-vodotokov-srednego-urala-vklyuchennykh-v/viewer> (дата обращения: 06.10.2023).
13. Биогенное загрязнение водных объектов в сельскохозяйственных районах Белгородской области / А. Г. Корнилов [и др.] // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47, № 1. С. 76–87. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87>
14. Дубровина И. А. Изменение содержания общего углерода, азота и фосфора в почвах таежной зоны Республики Карелия при сельскохозяйственном использовании // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 41. С. 27–41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-soderzhaniya-obshego-ugleroda-azota-i-fosfora-v-pochvah-taehnoy-zony-pri-selskohozyaystvennom-ispolzovanii/viewer> (дата обращения: 06.10.2023).
15. Бутько А. А., Родькин О. И. Прогнозирование поступления фосфора в водные объекты с территории агроландшафтов // Экологический вестник. 2012. № 2. С. 76–83. EDN: [NKANZG](#)
16. Перспективы сокращения выноса биогенных элементов с речных водосборов за счет внедрения наилучших доступных технологий сельскохозяйственного производства (по результатам моделирования) / Ш. Р. Позднякова [и др.] // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 588–602. <https://doi.org/10.31857/S0321059620050168>

17. Workshop Background Report Managing Nitrogen and Phosphorus Loads to Water Bodies: Characterisation and Solutions Towards Macro-Regional Integrated Nutrient Management Under Enlargement and Integration Action European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability JRC-Ispra (14–15 July 2014) / eds by A. Karabulut Aloe, et al. Ispra, 2014. 80 p. <https://doi.org/10.2788/14322>
18. Sengupta S., Nawaz T., Beaudry J. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater // Current Pollution Reports. 2015. Vol. 1. P. 155–166. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0013-1>
19. Ruzhitskaya O., Gogina E., Shmalko V. Effective Removal of Nutrients from Wastewater // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 178. Article no. 09015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817809015>
20. Breisha G.Z. Bio-removal of nitrogen from wastewaters – A review // Nature and Science. 2010. Vol. 8, Issue 12. P. 210–228. URL: [https://sciencepub.net/nature/ns0812/28\\_4053ns0812\\_210\\_228.pdf](https://sciencepub.net/nature/ns0812/28_4053ns0812_210_228.pdf) (дата обращения: 06.10.2023).

*Поступила в редакцию 04.12.2023; поступила после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 28.12.2023*

*Об авторах:*

**Джаббаров Нозим Исмоилович**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

**Савельев Анатолий Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

**Добринов Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

**Захаров Антон Михайлович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>, Researcher ID: S-4113-2018, bauermw@mail.ru

**Жуйков Илья Иванович**, аспирант Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3702-1485>, raynov96@mail.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Н. И. Джаббаров – научное руководство, формулирование концепции решения, моделирование процесса.

А. П. Савельев – анализ литературных источников, постановка задачи.

А. В. Добринов – анализ результатов исследования, составление структуры статьи.

А. М. Захаров – формулировка выводов.

И. И. Жуйков – расчет и анализ показателей.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Astarkhanov I.R., Astarkhanova T.S., Alibalaev D.A. Effect of Organic Fertilizers on Depletion of Nutrients by Potato Plants and Nutrient Content in Plants. *Dagestan GAU Proceedings*. 2022;(4):23–28. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **BGFCCE**
2. Plotnikov A.M., Sozinov A.V. The Balance of Nutrition Elements in Crop Rotation with the Use of Sapropele, Lime, Nitrogen-Phosphorus Fertilizer. *Agrochemistry and Ecology Problems*. 2022;(3–4):26–31. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **BSAYPK**
3. Tedeeva V.V., Abaev A.A., Tavkazakhov S.A. [Removal of Mineral Nutrition Elements by Weeds from the Soils of Soybean Areas]. *Tendentsii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya*. 2023;(97–8):94–97. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18411/trnio-05-2023-455>
4. Logvinov A.V., Shevchenko A.G., Koshkin S.S., Pleshakov A.A., Mukhanova S.M., Dmitrova E.S., et al. The Use of Fertilizers and the Removal of Nutrients by the Mother Sugar Beet of Summer Crops under Irrigation. *Sakharnaya Svekla*. 2022;(10):20–24. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **DCCYFG**
5. Morozova T.S., Litsukov S.D., Shiryaev A.V. Nutrient Content and Its Removal with Winter Wheat Plants Depending on Fertilizer Application. *Vestnik Agrarnoy Nauki*. 2021;(2):40–49. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-i-vynos-elementov-pitaniya-rasteniyami-ozimoy-pshenitsy-v-zavisimosti-ot-primeneniya-udobreniy/viewer> (accessed 06.10.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Artyukhova O.A., Gladysheva O.V., Svirina V.A. Mineral Nutrition Level and Nutrition Element Withdrawal Spring Barley in the Conditions of the Ryazan Region. *Plodorodie*. 2021;(4):6–10. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **ADXEBP**
7. Georgievsky V.Yu., Alekseev L.P., Bryukhanov A.Yu., Georgievsky D.V., Golosovsky P.A., Grek E.A., et al. Assessment and Forecast of Nutrient Loading from the Russian Part of the Zapadnaya Dvina River Basin to Belarus. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2022;86(2):243–254. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S2587556622020042>
8. Kornilov A.G., Kiselev V.V., Kurepina V.A., Lopina E.M., Borovlev A.E. Biogenic Pollution of Water Bodies in Agricultural Areas of the Belgorod Region. *Regional Geosystems*. 2023;47(1):76–87. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87>
9. Bryukhanov A.Yu., Kondratiev S.A., Oblomkova N.S., Ogluzdin A.S., Subbotin I.A. Calculation Method of Agricultural Nutrient Load on Water Bodies. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktsii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2016;(89):175–183. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **XAGHJT**
10. Zadonskaya O.V., Oblomkova N.S., Bryukhanov A.Yu. Comparative Application Analysis of Different Methods for Assessing the Agricultural Nitrogen and Phosphorus Inputs in the Narva River Basin. *AgroEkolInzheneriya*. 2022;(1):142–155. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-primeneniya-razlichnyh-metodov-otsenki-postupleniya-azota-i-fosfora-ot-selskogo-hozyaystva-v-basseynereki/viewer> (accessed 06.10.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Rakutin M.Yu., Kapustin T.N. Approach to Assessment of Pollution of Low-Studied Water Bodies with Biogenic Elements (On the Example of Nytvensky Pond, Perm Territory). *Astrahanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2020;(5):162–172. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **LJIACI**
12. Fedorova E.V., Karpunina O.P., Shchipacheva L.A., Belyaeva I.U. Assessment of Uncontrolled Runoff of Biogenic Substances from the Middle Ural Small Watercourses Catchment Territories Involved into Agriculture. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022;(1):68–86. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nekontroliruemogo-stoka-biogennyh-veschestv-s-vodosbornykh-territoriymalyh-vodotokov-srednego-urala-vklyuchennyh-v/viewer> (accessed 06.10.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kornilov A.G., Kiselev V.V., Kurepina V.A., Lopina E.M., Borovlev A.E. Biogenic Pollution of Water Bodies in Agricultural Areas of the Belgorod Region+. *Regional Geosystems*. 2023;47(1):76–87. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87>
14. Dubrovina I.A. Change in the Content of Total Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the Boreal Soils of the Republic of Karelia When Used in Agriculture. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2018;(41):27–41. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-soderzhaniya-obschego-ugleroda-azota-i-fosfora-v-pochvah-taizhnoy-zony-pri-selskohozyaystvennom-ispolzovanii/viewer> (accessed 06.10.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

15. Butko A.A., Rodkin O.I. Prognoz of Phosphorus Input in to the Water Objects from the Agrolandscape Areas. *Ekologicheskij Vestnik*. 2012;(2):6–83. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: NKANZG
16. Pozdnyakova Sh.R., Bryukhanov A. Yu., Kondratyeva S.A., Ignatieva N.V., Shmakova M.V., Minakovas E.A., et al. [The Prospects for Reducing the Removal of Biogenic Elements from River Catchments Through the Introduction of the Best Available Technologies for Agricultural Production (Based on Modeling Results)]. *Water Resources*. 2020;47(5):588–602. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0321059620050168>
17. Karabulut Aloe A., Bouraoui F., Grizzetti B., Bidoglio G., Pistocchi A., editors. Workshop Background Report Managing Nitrogen and Phosphorus Loads to Water Bodies: Characterisation and Solutions Towards Macro-Regional Integrated Nutrient Management Under Enlargement and Integration Action European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability JRC-Ispra (14–15 July 2014). Ispra, 2014. <https://doi.org/10.2788/14322>
18. Sengupta S., Nawaz T., Beaudry J. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater. *Current Pollution Reports*. 2015;1:155–166. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0013-1>
19. Ruzhitskaya O., Gogina E., Shmalko V. Effective Removal of Nutrients from Wastewater. *MATEC Web of Conferences*. 2018;178:09015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817809015>
20. Breisha G.Z. Bio-Removal of Nitrogen from Wastewaters – A Review. *Nature and Science*. 2010;8(12):210–228. Available at: [https://sciencepub.net/nature/ns0812/28\\_4053ns0812\\_210\\_228.pdf](https://sciencepub.net/nature/ns0812/28_4053ns0812_210_228.pdf) (accessed 06.10.2023).

*Submitted 04.12.2023; revised 15.12.2023; accepted 28.12.2023*

*About the authors:*

**Nozim I. Jabborov**, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production of the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

**Anatoliy P. Savelyev**, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, Institute of Mechanics and Power Engineering of the National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

**Aleksandr V. Dobrinov**, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Senior Research Officer, Department of Agroecology in Crop Production of the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

**Anton M. Zakharov**, Cand.Sci. (Engr.), Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>, Researcher ID: S-4113-2018, bauermw@mail.ru

**Ilya I. Zhuikov**, Postgraduate Student of the Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production (IEEP) Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3702-1485>, raynov96@mail.ru

*Authors contribution:*

N. I. Jabborov – scientific guidance, formulation of the solution concept, process modeling.

A. P. Savelyev – analysis of literary sources, problem statement.

A. V. Dobrinov – analysis of research results, compilation of the structure of the article.

A. M. Zakharov – formulation of conclusions.

I. I. Zhuikov – calculation and analysis of indicators.

*All authors have read and approved the final manuscript.*