



Моделирование и оценка уровня плодородия почвы

Н. И. Джабборов¹, А. П. Мишанов^{1✉}, А. В. Добринов¹,
А. П. Савельев²

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства (ИАЭП) –
филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет
(г. Саранск, Российская Федерация)

✉ amishanov@mail.ru

Аннотация

Введение. Актуальность темы исследования связана с проблемой повышения плодородия почвы. Ценность почвы как основного средства аграрного производства в конкретной хозяйственной инфраструктуре определяется ее плодородием, то есть способностью удовлетворять потребность конкретных растений в элементах питания, воде, обеспечивать их корневые системы воздухом и теплом. Эффективность процесса повышения плодородия почвы зависит от ее объективной оценки и прогнозирования, поэтому математическое моделирование уровня плодородия почв сельскохозяйственных угодий для производства сельскохозяйственной продукции является актуальной задачей агроинженерных исследований.

Цель исследования. Разработка математической модели для комплексной оценки уровня плодородия почвы.

Материалы и методы. При проведении научной работы были применены аналитические методы, обобщены посвященные данной проблеме исследования, проведенные различными учеными. Объектом изучения послужили опубликованные результаты научных исследований авторов, полученные по существу рассматриваемого вопроса.

Результаты исследования. На основе анализа литературы был обоснован перечень наиболее значимых показателей оценки, влияющих на плодородие почвы: содержание органического вещества (гумуса), кислотность, влажность, пористость почвы, микроорганизмы и глинистые частицы в почве, содержание подвижных форм азота, фосфора, обменного калия. Разработана математическая модель, позволяющая оценить по предложенным показателям уровень плодородия почвы.

Обсуждение и заключение. Приведены примеры расчета по средним и базовым значениям показателей с использованием предложенной математической модели, которые дают представление о наиболее типичных процедурах формирования показателей и оценки рассматриваемого процесса. Значение вероятностного коэффициента плодородия $L_{F_s} < 1$ свидетельствует об истощении (деградации) почвы, что не обеспечит получение экономически оправданного урожая. При этом состоянии требуется провести мероприятия для повышения плодородия почвы. В случае, когда $L_{F_s} > 1$, почва является плодородной и способна снабжать растения питательными веществами, водой и воздухом для их

© Джабборов Н. И., Мишанов А. П., Добринов А. В., Савельев А. П., 2024



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

полноценного роста и развития. Таким образом, уровень плодородия почвы является важным критерием оценки влияния агротехнологий на экологическую безопасность и устойчивое состояние окружающей среды.

Ключевые слова: уровень плодородия почвы, показатели комплексной оценки, математическая модель, вероятностный коэффициент

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Моделирование и оценка уровня плодородия почвы / Н. И. Джабборов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 407–423. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.407-423>

Modeling and Assessment of Soil Fertility Level

N. I. Jabborov^a, A. P. Mishanov^a ✉, A. V. Dobrinov^a,
A. P. Savelyev^b

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

^b *National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)*

✉ amishanov@mail.ru

Abstract

Introduction. The relevance of the study is related to the problem of increasing soil fertility. The value of soil as the main means of agricultural production in a specific economic infrastructure is determined by its fertility that is its ability to satisfy the needs of specific plants for nutrients, water, and to provide the root system of plants with air and heat. The effectiveness of increasing soil fertility depends on objective soil assessments and forecasting. Therefore, mathematical modeling for the fertility level of soils for the agricultural production is an urgent task for agroengineering studies.

Aim of the Study. The study is aimed at developing a mathematical model for an integrated assessment of soil fertility levels.

Materials and Methods. When conducting the study, analytical methods were used and the results obtained by various authors on this problem were summarized. The object of the study was the published results of scientific researches by the authors from other scientific institutions obtained on the problem under consideration.

Results. Based on an analysis of the literature references, there was made a scientifically-based list of the most significant indicators for assessing soil fertility, which includes the content of organic matter (humus), acidity, humidity, soil porosity, presence of microorganisms and clay particles, content of mobile forms of nitrogen, phosphorus and exchangeable potassium. A mathematical model has been developed based on the criterion of maximum soil fertility, which makes it possible to assess the level of soil fertility using the proposed indicators.

Discussion and Conclusion. The examples of calculations based on average and basic values of indicators with the use of the proposed mathematical model are presented. They give an idea of the most typical procedures for generating indicators and assessing the process under consideration. The value of the fertility probabilistic coefficient $L_{F_s} < 1$ indicates soil depletion (degradation), which will not ensure an economically sound harvest. In this case, measures must be taken to increase soil fertility. When $L_{F_s} > 1$, the soil is fertile and is able to supply plants with nutrients, water and air for their growth and development. The soil fertility level is an important criterion for assessing the impact of agricultural technologies on environmental safety and the environment state.

Keywords: soil fertility level, integrated assessment indicators, mathematical model, probabilistic coefficient

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

For citation: Jabborov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V., Savelyev A.P. Modeling and Assessment of Soil Fertility Level. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):407–423. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.407-423>

Введение. Плодородие – это способность почвы удовлетворять потребности растений в элементах питания, воде, обеспечивать их корневые системы достаточным количеством воздуха, тепла и благоприятной физико-химической средой для нормального их роста и развития. Плодородие является важнейшим свойством почвы. Питание, вода, воздух, тепло – главнейшие слагаемые плодородия почв. В почвоведении принято различать следующие виды плодородия:

– естественное (сложившееся на основе природного течения процессов почвообразования, без участия человека; к такому виду, например, относятся целинные земли);

– естественно-антропогенное (складывается на основе естественного почвообразования и сознательных действий человека в этой сфере);

– искусственное (складывается посредством действий человека на основе ряда комбинаций факторов плодородия, обычно формируется при создании и использовании субстратов, предназначенных для возделывания сельскохозяйственных культур в условиях защищенного грунта);

– относительное (складывается в отношении некоей культуры, а также ряда культур, имеющих схожие биологические показатели);

– потенциальное (представляет собой определенную совокупность характеристик почвы, с помощью которых растения могут получать продолжительный период важные микроэлементы для роста и развития);

– эффективное (поддерживает продуктивность растений и зависит от наличия благоприятных погодных показателей);

– экономическое (определяется по уровню затрат на получение планируемой урожайности в стоимостных показателях).

Оценка плодородия почв имеет первостепенное значение для формирования величины урожайности и базируется на основе значений отдельных показателей всех основных свойств почв, определяющих продуктивность растений¹.

Цель работы – обоснование наиболее значимых показателей плодородия почвы, моделирование процесса формирования и оценка ее уровня.

¹ ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 11 с.; ГОСТ 26212-2021. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.; ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М. : Стандартинформ, 2016. 19 с.; ГОСТ Р 54650-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М. : Стандартинформ, 2013. 8 с.; Микроорганизмы почвы [Электронный ресурс]. URL: <https://helpiks.org/6-52859.html> (дата обращения: 22.04.2024); Качинский Н. А. Физика почв. Часть 1. М. : Высшая школа, 1965. 320 с.; Гродзинский А. М. Аллелопатия растений и почвоутомление: избранные труды. Киев : Наукова думка, 1991. 432 с.

Обзор литературы. Одной из неразрешенных проблем современной науки является обеспечение экологической безопасности технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции. Именно в земледелии особое значение приобрели вопросы поддержания почвенного плодородия для обеспечения роста культурных растений и повышения их урожайности.

Авторы работы [1] исследовали влияние различных по интенсивности систем обработки почвы, удобрений и пестицидов на содержание органического вещества в почве, агрофизические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур. В результате установлено, что на дерново-среднеподзолистой глееватой среднесуглинистой почве рационально использовать поверхностно отвальную обработку (SP) по фону SNPK (солома + NPK). Такой комбинированный прием дает значительное увеличение содержания органического вещества в почве, а также способствует улучшению ее агрофизических свойств.

Автором статьи [2] проведен анализ пространственной изменчивости показателей в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Им установлено, что в пределах одного поля коэффициент оборота агрохимических показателей дохода колеблется в пределах от 10 до 67 %. Это обстоятельство указывает на дисбаланс между продуктами питания в исследуемой почве. Для оптимального питания растений требуется применять в рациональном соотношении азот, калий, цинк и медь.

В исследовании [3] оценено плодородие дерново-подзолистой почвы в севообороте на основе существующих систем удобрений. Оказалось, что органическая система удобрений замедляет подкисление почвы, повышает ее структурно-агрегатный состав, гумус. Используемый при этом навоз в дозах 5 и 10 т на га не поддерживает необходимый уровень органического вещества почвы.

В исследовании [4] изложены результаты оценки гумусового состояния и микроэлементного фонда почвы природных и агрогенных экосистем степной зоны. Установлено, что под влиянием интенсивного использования нарушается функционирование почвы как экологически уравновешенной системы, процессы накопления гумуса более интенсивно проходят в основном корнесодержащем слое почвы (0–40 см).

Авторы работы [5] предлагают общее состояние плодородия почвы оценивать по ряду групповых показателей, среди которых основными являются динамические (подвижные элементы питания, кислотность), конституционные прямые (минералогический, гранулометрический, органический и химический составы), конституционные косвенные (емкость катионного обмена, сорбционная емкость, буферность).

В работе [6] установлено, что комплексное применение минеральных и органических удобрений повышает обеспеченность почвы подвижным фосфором. Наблюдается улучшение агрохимических показателей роста продуктивности севооборота на 3,9–4,1 т к.е./га.

Авторами исследования [7] оценка и оптимизация плодородия почвы производилась с помощью кластерного анализа, дискриминантного анализа и метода главных компонент (МГК). Показатель МГК позволил определить вклад каждого почвенного параметра в разделении на группы.

Результаты исследования авторов [8], полученные в ходе продолжительного эксперимента на черноземе, дали возможность оценить преобразования агрофизических, агрохимических и биологических свойств почвы в шестипольном обороте в условиях проведения нескольких систем обработки почвы. Так, минимальная мульча создает необходимое соотношение факторов минерализации и гумификации органического вещества, по сравнению с традиционной, улучшает структуру почвы. При этом урожайность возделываемых культур (озимая пшеница, подсолнечник) практически не зависела от системы основной обработки. Отмечается, что высокая урожайность таких культур, как соя и кукуруза, была получена при традиционной системе.

В работе [9] проведена оценка исходного состояния плодородия пашни на основе агрохиманализа (содержание гумуса, азота, фосфора, калия и гидролитической кислотности) в соответствии с «интегральным показателем плодородия земли», предложенным учеными С. А. Пеговым и П. М. Хомяковым, благодаря которому был определен вектор действий, позволяющих повысить эффективность комплекса мелиоративных мероприятий.

Авторами [10] разработана методика оценки степени деградации почв в яблоневых садах и обоснована возможность оценки степени деградации местности как характеристики уровня агротехники в сельском хозяйстве.

Установлено, что приемлемое почвенное плодородие достигается при обменной кислотности не ниже 5,2–5,4 ед., при содержании подвижных форм калия и фосфора не ниже 125–143 и 170–194 мг/кг соответственно [11].

Исследованием [12] обосновано, что изменение структуры посевных площадей и севооборотов приведет к уменьшению антропогенной нагрузки, а также себестоимости продукции, производимой с 1 га, и тем самым повысит устойчивость агроэкосистемы.

В работе [13] при исследовании эффективности дифференцированного внесения удобрений при точном земледелии применена установка, которая позволяет контролировать ряд показателей плодородия почвы с использованием разработанного экспериментального твердомера.

Оценка уровня плодородия почвы проводилась по содержанию серы и микроэлементов, экотоксикологического ее состояния – по валовым и подвижным формам тяжелых металлов и мышьяка [14]. Также был установлен характер взаимовлияния обменной кислотности, количества органического вещества и гранулометрического состава почв с содержанием доступных форм микроэлементов, валовых и подвижных форм металлов и мышьяка.

Автором статьи [15] предложен комплексный способ геоэкологической оценки сельскохозяйственного использования, на основе которого определяют несколько показателей с выделением их в группы: агрохимические, деградация, физическое состояние почв, содержание микроэлементов-загрязнителей.

В работе [16] рассмотрено радиоактивное загрязнение почв как самостоятельный тип деградации, ведущий к снижению их плодородия. Описана естественная радиоактивность почв, проанализированы вопросы реабилитации почв сельскохозяйственного назначения при радиационных авариях, связанных с выбросом техногенных радионуклидов в окружающую среду.

Одним из наиболее весомых показателей оценки для поддержания водного и воздушного режимов питания растений является плотность почвы. С увеличением плотности происходит уменьшение пористости почвы, что приводит к снижению ее плодородия. Одной из проблем является кумулятивный эффект переуплотнения, при многократных проездах движителей машинно-тракторных агрегатов. Образованный при этом уплотненный слой ухудшает физические и биохимические свойства почвы. Замечено, что в переуплотненном слое почвы отсутствуют дождевые черви, с помощью которых питательные вещества в почве преобразуются в усвояемую растениями форму [17].

В работе [18] изложены научные принципы снижения энергетических, трудовых, а также финансовых вложений, направленных на восстановление заброшенных сельскохозяйственных угодий, а также на воспроизводство плодородия при введении в оборот земель имеющих высокую влажность.

В исследовании [19] предложены агроэкологические принципы формирования зональной системы обработки почвы. Из результатов исследований следует, что при выборе технологий возделывания сельскохозяйственных культур следует опираться на дифференциацию способов и приемов обработки с учетом особенностей агроландшафта, свойств и степени плодородия, вида культуры, уровня влияния эрозии, гидрологических условий, фитосанитарного состояния почвы. Система дифференциации дает возможность улучшить экологическую безопасность технологий, а также повысить эффективность использования топливно-энергетических ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции.

Для обобщенной оценки плодородия почвы часто используют агропроизводственные факторы, с помощью которых можно осуществлять прогноз состояния (динамики) отдельных показателей плодородия. При этом учитываются освещенность, тепло, влагообеспеченность, наличие гумуса, питательные вещества, реакция почвенной среды, густота растений и другие весомые показатели, основным из которых является урожайность.

И. И. Кармановым предложен расчет², основанный на нахождении интегрального показателя различных свойств (содержание гумуса, подвижного фосфора и обменного калия в зависимости от типа почв, рН и гидролитической кислотности, степени насыщенности почв основаниями) с построением математической модели преобразования свойств почв с учетом их воздействия на общий уровень плодородия.

Также распространены действующие способы оценки плодородия почв по относительному и совокупному баллам. В первом случае расчет проводят по следующим агрохимическим показателям: кислотность почвы, содержание гумуса, фосфора, калия, кальция, магния, основных микроэлементов, сумма поглощенных оснований и степень насыщенности почв основаниями. Во втором случае с учетом уже имеющихся показателей дополнительно определяют мощность гумусового горизонта, запасы гумуса в гумусовом горизонте, содержание физической глины в пахотном слое.

² Карманов И. И. Плодородие почв СССР (Природные закономерности и количественная оценка). М. : Колос, 1980. 224 с.

Л. М. Державин, А. С. Фрид [20] предложили основной оценочный балл для полного плодородия почв определять по элементам питания растений. Действие других факторов учитывается через поправочные коэффициенты, один из которых является ключевым.

В утвержденной Министерством сельского хозяйства РФ методике плодородие можно рассчитывать, исходя из установленного перечня показателей состояния плодородия земель сельскохозяйственного назначения. В основу расчета берется усредненное значение от суммы соотношений фактических значений четырех агрохимических показателей (кислотность почв, содержание гумуса, подвижных форм фосфора и обменного калия) к их оптимальным значениям по типам почв посевных площадей сельскохозяйственных культур³.

Отечественный производственный опыт и представленные результаты научных исследований свидетельствуют, что для эффективной оценки плодородия земель сельскохозяйственного назначения необходим комплексный подход, обеспечивающий учет ряда интегральных показателей. Для достоверной полной оценки требуется моделирование процесса изменения плодородия почвы на основе наиболее весомых оценочных показателей, таких как содержание органического вещества (гумуса), кислотность, влажность, содержание подвижных форм азота, фосфора и калия, пористость, количество микроорганизмов (бактерий и грибов), содержание глинистых частиц в почве.

Материалы и методы. При проведении настоящего исследования были использованы аналитические методы, обобщены результаты, полученные различными авторами, изучающими проблему оценки плодородия почвы.

Объектами исследований послужили научные статьи и нормативные документы, посвященные оценке плодородия почвы.

Исследования проводились поэтапно в следующей последовательности: анализ литературных источников; определение наиболее весомых показателей оценки плодородия почвы; формализация основного критерия оценки плодородия почвы; разработка математической модели для комплексной оценки плодородия почвы.

Результаты исследования. Исходя из представленного анализа результатов исследований, мы определили, что на плодородие почвы в значительной степени оказывают влияние содержание органического вещества, кислотность, влажность, пористость почвы, содержание подвижных форм фосфора, калия, микроорганизмов и глинистых частиц.

В этом случае плодородие почвы может быть выражено формулой:

$$F_s = f(X_{\text{гум}}, \text{pH}, W, N_n, P_2O_5, K_2O, X_{\text{пор}}, K_{\text{мо}}, n_{\text{гл}}),$$

где $X_{\text{гум}}$ – содержание органического вещества (гумуса) в почве, %; pH – кислотность почвы, ед.; W – влажность почвы, %; N_n – содержание подвижных форм азота в почве, мг/кг; P_2O_5 – содержание в почве подвижных форм фосфора, мг/кг;

³ Об утверждении Методики расчета показателя почвенного плодородия в субъекте Российской Федерации [Электронный ресурс] : Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 6 июля 2017 г. № 325. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456080018?marker=6540IN> (дата обращения: 25.04.2024).

K_2O – содержание в почве обменного калия, мг/кг; $X_{\text{пор}}$ – пористость почвы, %; $K_{\text{мо}}$ – количество микроорганизмов (бактерий и грибов), КОЕ в 1 г почвы (колониеобразующая единица (КОЕ) – величина, которая показывает количество микробных клеток (бактерий, грибов и т. д.) или неклеточных форм жизни (вирусов и вирионов) в образце, которые являются жизнеспособными и (или) способными размножиться путем деления в контролируемых условиях); $n_{\text{гл}}$ – содержание глинистых частиц в почве, %.

На рисунке представлена схема определения критерия максимума плодородия почвы, оцениваемого по вероятностному коэффициенту $L_{F_s} \rightarrow \text{max}$ в соответствии с представленными оценочными показателями.

Оценку степени плодородия почвы следует производить по вероятностному коэффициенту – максимуму плодородия почвы $L_{F_s} \rightarrow \text{max}$.

Вероятностный коэффициент L_{F_s} , показывающий степень плодородия почвы, может быть рассчитан по формуле:

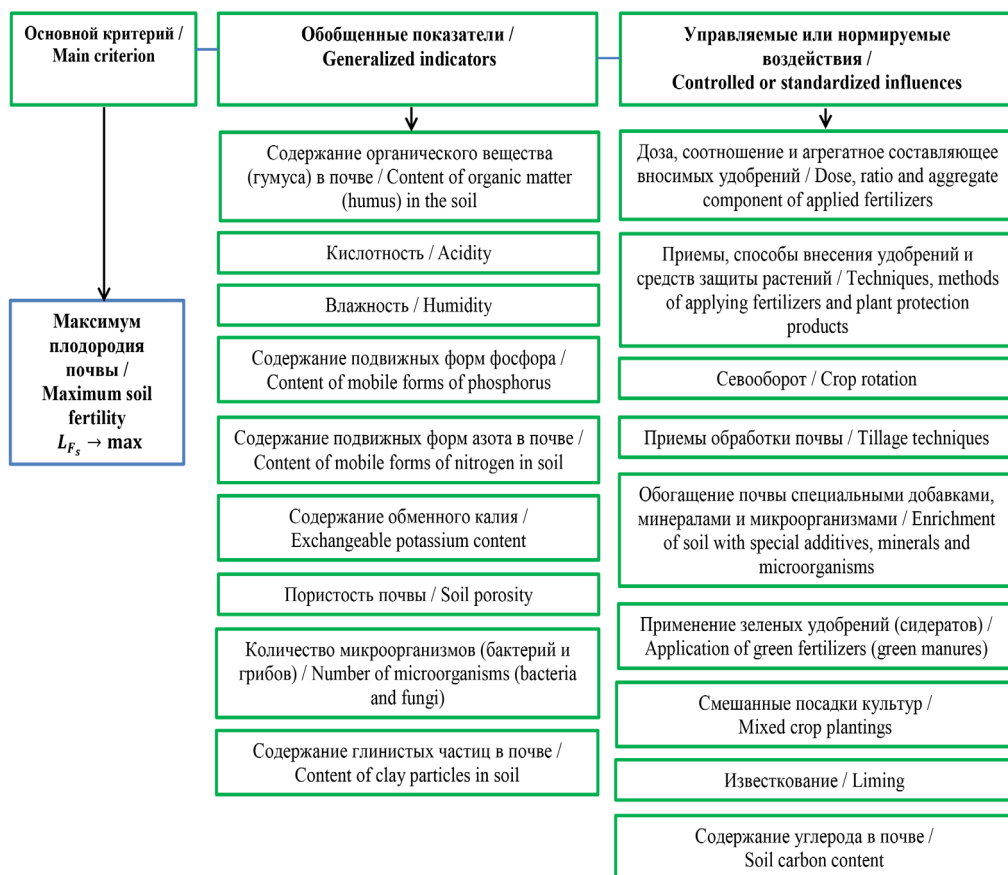
$$L_{F_s} = \frac{1}{9} \left(L_{X_{\text{гум}}} + L_{\text{pH}} + L_W + L_{N_n} + L_{P_2O_5} + L_{K_2O} + L_{X_{\text{пор}}} + L_{K_{\text{мо}}} + L_{n_{\text{гл}}} \right), \quad (1)$$

где $L_{X_{\text{гум}}}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания органического вещества (гумуса) в почве; L_{pH} – вероятностный коэффициент, показывающий уровень кислотности почвы; L_W – вероятностный коэффициент, показывающий уровень влажности почвы; L_{N_n} – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания подвижных форм азота в почве; $L_{P_2O_5}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания в почве подвижных форм фосфора; L_{K_2O} – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания в почве обменного калия; $L_{X_{\text{пор}}}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень пористости почвы; $L_{K_{\text{мо}}}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень обеспечения почвы микроорганизмами (бактериями и грибами); $L_{n_{\text{гл}}}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания глинистых частиц в почве.

Вероятностный коэффициент $L_{X_{\text{гум}}}$, показывающий уровень содержания органического вещества (гумуса) в почве, можно определить из выражения:

$$L_{X_{\text{гум}}} = \frac{X_{\text{гум}}^{\text{ср}}}{X_{\text{гум}}^{\text{б}}},$$

где $X_{\text{гум}}^{\text{ср}}$ – среднее значение содержания органического вещества (гумуса) в почве; $X_{\text{гум}}^{\text{б}}$ – базовое (нормативное) значение содержания органического вещества (гумуса) в почве.



Р и с. Схема для определения критерия максимума плодородия почвы, оцениваемого по вероятностному коэффициенту $L_{F_s} \rightarrow \max$ с другими зависящими от него показателями

F i g. Scheme for determining the criterion for maximum soil fertility, assessed by the probability coefficient $L_{F_s} \rightarrow \max$ with other indicators that depend on it

Источник: составлено авторами статьи.

Source: the diagram is compiled by the authors of the article.

Вероятностный коэффициент L_{pH} , показывающий уровень кислотности почвы, можно определить из выражения:

$$L_{pH} = \frac{(pH)^{cp}}{(pH)^{\delta}}, \quad (2)$$

где $(pH)^{cp}$ – среднее значение кислотности почвы; $(pH)^{\delta}$ – базовое (нормативное) значение кислотности почвы.

Вероятностный коэффициент L_{w} , показывающий уровень влажности почвы, может быть рассчитан по формуле:

$$L_W = \frac{W^{\text{cp}}}{W^{\text{б}}}, \quad (3)$$

где W^{cp} – среднее значение влажности почвы; $W^{\text{б}}$ – базовое значение влажности почвы.

Вероятностный коэффициент L_{N_n} , показывающий уровень содержания подвижных форм азота в почве, можно определить из выражения:

$$L_{N_n} = \frac{N_n^{\text{cp}}}{N_n^{\text{б}}},$$

где N_n^{cp} – среднее значение подвижных форм азота в почве; $N_n^{\text{б}}$ – базовое значение подвижных форм азота в почве.

Вероятностный коэффициент $L_{P_2O_5}$, показывающий уровень содержания в почве подвижных форм фосфора, можно представить в виде:

$$L_{P_2O_5} = \frac{(P_2O_5)^{\text{cp}}}{(P_2O_5)^{\text{б}}},$$

где $(P_2O_5)^{\text{cp}}$ – среднее значение содержания в почве подвижных форм фосфора; $(P_2O_5)^{\text{б}}$ – базовое значение содержания в почве подвижных форм фосфора.

Вероятностный коэффициент L_{K_2O} , показывающий уровень содержания в почве обменного калия, можно найти по уравнению:

$$L_{K_2O} = \frac{(K_2O)^{\text{cp}}}{(K_2O)^{\text{б}}},$$

где $(K_2O)^{\text{cp}}$ – среднее значение содержания в почве обменного калия L_{K_2O} ; $(K_2O)^{\text{б}}$ – базовое (нормативное) значение содержание в почве обменного калия.

Вероятностный коэффициент $L_{X_{\text{пор}}}$, показывающий уровень пористости почвы, определяют из соотношения:

$$L_{X_{\text{пор}}} = \frac{X_{\text{пор}}^{\text{cp}}}{X_{\text{пор}}^{\text{б}}}, \quad (4)$$

где $X_{\text{пор}}^{\text{cp}}$ – среднее значение пористости почвы; $X_{\text{пор}}^{\text{б}}$ – базовое значение пористости почвы.

Вероятностный коэффициент $L_{K_{\text{мо}}}$, показывающий уровень обеспечения почвы микроорганизмами (бактериями и грибами), определяется с помощью уравнения:

$$L_{K_{\text{мо}}} = \frac{K_{\text{мо}}^{\text{cp}}}{K_{\text{мо}}^{\text{б}}},$$

где $K_{\text{мо}}^{\text{ср}}$ – среднее значение количества микроорганизмов (бактерий и грибов) в почве; $K_{\text{мо}}^{\text{б}}$ – базовое количество микроорганизмов (бактерий и грибов) в почве.

Вероятностный коэффициент $L_{n_{\text{гл}}}$, показывающий уровень содержания глинистых частиц в почве, можно найти по уравнению:

$$L_{n_{\text{гл}}} = \frac{n_{\text{гл}}^{\text{ср}}}{n_{\text{гл}}^{\text{б}}}, \quad (5)$$

где $n_{\text{гл}}^{\text{ср}}$ – среднее значение содержания глинистых частиц в почве; $n_{\text{гл}}^{\text{б}}$ – базовое значение содержания глинистых частиц в почве.

Сущность предложенной модели сводится к объединению отдельно рассчитываемых показателей оценки и прогнозирования плодородия почвы в единое целое. Такой подход позволяет дать комплексную оценку плодородия почвы. В таблице приведены базовые и средние значения показателей, а также подсчитано значение коэффициента (показателя) L_{F_s} для оценки степени плодородия почвы.

Следует отметить, что если при оценке кислотности (рН), влажности (W) и пористости ($X_{\text{пор}}$) почвы, а также при оценке содержания глинистых частиц в почве ($n_{\text{гл}}$) численные значения соответствующих коэффициентов $L_{\text{рН}}$, L_W , $L_{X_{\text{пор}}}$ и $L_{n_{\text{гл}}} > 1$, то это свидетельствует об ухудшении плодородия почвы. В этом случае, при расчете коэффициентов $L_{\text{рН}}$, L_W , $L_{X_{\text{пор}}}$ и $L_{n_{\text{гл}}}$ по формулам (2), (3), (4) и (5), базовые значения показателей необходимо разделить на средние (фактические) их значения.

Ниже представлены два варианта расчета показателей плодородия почвы:

– в варианте 1 средние (фактические) значения показателей не превышают базовые значения;

– в варианте 2 средние (фактические) значения показателей превышают базовые значения.

По данным таблицы вероятностный коэффициент L_{F_s} , показывающий степень плодородия почвы для варианта 1, равен:

$$\begin{aligned} L_{F_s} &= \frac{1}{9} \left(L_{X_{\text{гум}}} + L_{\text{рН}} + L_W + L_{N_n} + L_{\text{P}_2\text{O}_5} + L_{\text{K}_2\text{O}} + L_{X_{\text{пор}}} + L_{K_{\text{мо}}} + L_{n_{\text{гл}}} \right) = \\ &= \frac{1}{9} (0,90 + 0,93 + 0,88 + 0,73 + 0,80 + 0,82 + 0,91 + 0,80 + 0,93) = 0,86. \end{aligned}$$

Для варианта 2:

$$\begin{aligned} L_{F_s} &= \frac{1}{9} \left(L_{X_{\text{гум}}} + L_{\text{рН}} + L_W + L_{N_n} + L_{\text{P}_2\text{O}_5} + L_{\text{K}_2\text{O}} + L_{X_{\text{пор}}} + L_{K_{\text{мо}}} + L_{n_{\text{гл}}} \right) = \\ &= \frac{1}{9} (2,25 + 0,72 + 0,64 + 1,95 + 1,6 + 1,36 + 0,85 + 2,5 + 0,63) = 1,39. \end{aligned}$$

Т а б л и ц а
T a b l eПоказатели и вероятностные коэффициенты оценки плодородия почвы
Indicators and probability coefficients for assessing soil fertility

Значение / Meaning	$X_{гум}$, %	pH, ед.	W , %	N_n , мг/кг / mg/kg	P_2O_5 , мг/кг / mg/kg	K_2O , мг/кг / mg/kg	$X_{пор}$, %	$K_{мо}$, КОЕ в 1 г почвы / CFU in 1 g of soil	$n_{гп}$, %
Базовое / Basic	2,0	5,5	16	41	250	220	55	$1,0 \cdot 10^9$	40
Среднее (вариант 1) / Average (option 1)	1,80	5,10	14	30	200	180	50	$0,8 \cdot 10^9$	37
Вероятностный коэффициент L (вариант 1) / Probability coefficient L (option 1)	0,90	0,93	0,88	0,73	0,80	0,82	0,91	0,80	0,93
Среднее (вариант 2) / Average (option 2)	4,50	7,60	25	80	400	300	65	$2,5 \cdot 10^9$	63
Вероятностный коэффициент L (вариант 2) / Probability coefficient L (option 2)	2,25	0,72	0,64	1,95	1,60	1,36	0,85	2,50	0,63

При соответствии средних (фактических) значений показателей базовым значениям показателей вероятностные коэффициенты будут равны или будут стремиться к единице. Если значение коэффициента $L_{F_s} < 1$, то это свидетельствует об истощении почвы. При этом требуется разработка мероприятий по восстановлению плодородия почвы, чтобы обеспечить высокую рентабельность производства продукции растениеводства.

Анализ литературных источников показал, что для оценки уровня плодородия почвы в различных природно-климатических условиях применяют показатели, характеризующие ландшафтно-экологические, эколого-генетические, физические, водно-физические, агрохимические, биологические и эколого-токсикологические особенности почвы. Вместе с тем, перечень показателей оценки плодородия почвы должен уточняться для конкретных условий производства сельскохозяйственной продукции.

Предложенный нами критерий (максимум уровня плодородия почвы $L_{F_s} \rightarrow \max$) обеспечивает комплексную оценку уровня плодородия почвы

с учетом наиболее весомых показателей, перечень которых приведен на рисунке и используется при расчетах по формуле (1).

Оценка уровня плодородия почвы по формуле (1) дает возможность разработать мероприятия, направленные на поддержание или воспроизводство плодородия почвы. Одним из вариантов поддержания плодородия почвы является предложенное российскими и финскими учеными производство продукции с использованием органических удобрений без применения химических средств защиты растений от вредителей и болезней для получения продукции высокого качества с минимальным негативным воздействием на окружающую среду [21].

Рассмотренные показатели плодородия почвы также являются наиболее весомыми показателями при оценке антропогенного воздействия на экологические параметры агроэкосистемы – диффузной нагрузки на водные объекты и выбросы климатически активных веществ.

В совокупности оценка по данным показателям позволит своевременно осуществлять мероприятия по обеспечению устойчивого состояния окружающей среды.

Обсуждение и заключение. На основе аналитического обзора выбраны наиболее весомые показатели оценки уровня плодородия почвы: содержание органического вещества (гумуса), кислотность, влажность, пористость почвы, содержание подвижных форм азота, фосфора, калия, количество микроорганизмов и глинистых частиц в почве.

Разработана математическая модель для комплексной оценки уровня плодородия почвы с учетом выбранных показателей.

Рассмотрены примеры расчета по средним и базовым значениям показателей с использованием предложенной математической модели, которые дают представление о наиболее типичных процедурах формирования показателей и оценки рассматриваемого процесса.

Предложенная методика позволяет рассчитать уровень плодородия почвы и заключить, что при $L_F < 1$ почва является истощенной, при этом появляется необходимость в проведении мелиоративных работ. При $L_F > 1$, почва считается плодородной, что обеспечивает высокую рентабельность производимой сельскохозяйственной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка действия энергосберегающих технологий основной обработки почвы на содержание органического вещества и агрофизические показатели плодородия / С. В. Щукин [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 4 (56). С. 119–126. URL: <https://clck.ru/3CkNWs> (дата обращения: 25.04.2024).

2. Мудрых Н. М. Оценка плодородия почвы – основа сбалансированности питания растений // АгроЭкоИнфо. 2018. № 3. URL: https://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_320.doc (дата обращения: 25.04.2024).

3. Кузьменко Н. Н. Оценка плодородия дерново-подзолистой почвы при применении разных систем удобрений в севообороте // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2019. № 1 (41). С. 38–44. EDN: WSTBDU

4. Подобед О. Ю., Чабан В. И. Оцінка окремих показників родючості ґрунту природних і агрогенних екосистем зони степу // *Зернові культури*. 2018. Т. 2, № 2. С. 330–336. EDN: XJMPUN
5. Оценка конституционной основы плодородия агросерой почвы / А. В. Ручкина [и др.] // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2021. № 1. С. 57–61. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/1/57-61>
6. Наумченко Е. Т., Банецкая Е. В. Оценка изменения плодородия почвы и продуктивности агроценоза при длительном внесении удобрений // *Плодородие*. 2023. № 1 (130). С. 39–41. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.130.09>
7. Оценка и оптимизация плодородия агросерой почвы методами многомерного статистического анализа / Р. Н. Ушаков [и др.] // *Агрохимия*. 2022. № 12. С. 69–78. <https://doi.org/10.31857/S0002188122120134>
8. Оценка изменения плодородия чернозема выщелоченного Краснодарского края в зависимости от систем основной обработки почвы / П. П. Васюков [и др.] // *Плодородие*. 2018. № 3 (102). С. 17–20. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.102.06>
9. Гумбаров А. Д., Долобешкин Е. В. Оценка исходного агрохимического индекса плодородия пашни по средневзвешенным интегральным показателям // *Новые технологии*. 2019. № 2 (48). С. 204–216. <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10220>
10. Агроэкологическая оценка степени деградации лугово-черноземной почвы в яблоневых садах на примере ФГПУ «Мичуринское» Тамбовской области / В. Л. Захаров [и др.] // *АгроЭкоИнфо*. 2023. № 3. URL: https://www.agroecoinfo.ru/TEXT/RUSSIAN/2023/st_316_annot.html (дата обращения: 25.04.2024).
11. Ушаков Р. Н., Ручкина А. В., Елизаров А. О. К вопросу об информационном управлении плодородием почв // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева*. 2021. Т. 13, № 3. С. 85–92. EDN: TKEEGZ
12. Агроэкологическая оценка аграрного землепользования как основа повышения его устойчивости / А. А. Бунин [и др.] // *Вестник КрасГАУ*. 2021. № 4 (169). С. 80–86. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-80-86>
13. Милюткин В. А., Канаев М. А. Разработка технических средств мониторинга плодородия почв с исследованием эффективности дифференцированного внесения удобрений при точном земледелии // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017. № 2 (64). С. 92–95. EDN: YMXGUJ
14. Уткин А. А. Мониторинг плодородия и экотоксикологического состояния реперных участков дерново-подзолистых почв Ивановской области // *Агрохимия*. 2023. № 4. С. 19–31. <https://doi.org/10.31857/S0002188123040130>
15. Волошенко И. В. Геоэкологическая оценка обрабатываемых почв // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 4. С. 32–37. <https://doi.org/10.17513/use.38021>
16. Алексахин Р. М. Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации // *Почвоведение*. 2009. № 12. С. 1487–1498. EDN: KYGCWP
17. Окунев Г. А., Астафьев В. Л., Кузнецов Н. А. Влияние уплотняющего воздействия на почву в реализации энергосберегающих технологий // *АПК России*. 2017. Т. 24, № 5. С. 1188–1194. EDN: ZXVRFD
18. Джабборов Н. И., Федькин Д. С., Михайлов А. С. Обоснование системы технологических процессов восстановления необрабатываемых земель в условиях повышенного увлажнения // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2014. № 5 (10). С. 66–68. EDN: TAQOXH
19. Джабборов Н. И., Добринов А. В., Федькин Д. С. Агроэкологические принципы формирования зональной системы обработки почвы // *Региональная экология*. 2015. № 5 (40). С. 23–27. EDN: VDWGMZ
20. Державин Л. М., Фрид А. С. О комплексной оценке плодородия пахотных земель // *Агрохимия*. 2001. № 9. С. 5–12. EDN: VLZVGZ
21. Подходы к освоению органического земледелия / Д. А. Максимов [и др.] // *АгроЭкоИнженерия*. 2020. № 4 (105). С. 101–113. EDN: FEVOAU

REFERENCES

1. Shchukin S.V., Gornich E.A., Trufanov A.M., Voronin A.N. Assessment of the Effect of Energysaving Primary Tillage Technologies on Organic Matter Content and Agrophysical Properties of the Soil. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2019;4(56):119–126. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3CkNWs> (accessed 25.04.2024).
2. Mudryh N.M. [Assessment of Soil Fertility – Basis of Balanced Power of Nutrition Plants]. *AGRO-ECOINFO*. 2018;3. (In Russ.) Available at: https://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_320.doc (accessed 25.04.2024).
3. Kuzmenko N.N. Estimation of Fertility of Sod-Podzolic Soil in the Application of Different Systems of Fertilizers in Crop Rotation. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2019;1(41):38–44. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **WSTBDU**
4. Podobed O.U., Chaban V.I. Estimation of Separate Indices of Soil Fertility of Natural and Agro-genic Ecosystems of the Steppe Zone. *Grain Grops*. 2018;2(2):330–336. (In Ukr., abstract in Eng.) EDN: **XJMPUN**
5. Ruchkina A.V., Ushakov R.N., Novikov N.N., Ushakova T.Yu., Aseev V.Yu., Bobrakov F.Yu. Assessment of Constitutional Base of Agro-Grey Soil Fertility. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2021;1:57–61. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/1/57-61>
6. Naumchenko E.T., Banetskaya E.V. Assessment of Changes in the Level of Soil Fertility and Productivity of Agroecosystem in Conditions of Long-Term use of Fertilizers. *Plodorodie*. 2023;1(130):39–41. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.130.09>
7. Ushakov R.N., Ushakova T.Yu., Ruchkina A.V., Abdulazyanova K.V., Bobrakov F.Yu. Assessment and Optimization of Agricultural Gray Soil Fertility by Methods of Multidimensional Statistical Analysis. *Agrohimiya*. 2022;12:69–78. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0002188122120134>
8. Vasyukov P.P., Lesovaya G.M., Chuvarleeva G.V., Mnatsakanyan A.A., Bykov O.B., Muhina M.T. Evaluation of Leached Chernozem Fertility Changes in Krasnodar Krai as a Function of Tillage Systems. *Plodorodie*. 2018;3(102)17–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.102.06>
9. Gumbarov A.D., Dolobeshkin E.V. Estimation of the Initial Agrochemical Index of Farmland Fertility by Average Weighted Integral Indices. *New Technologies*. 2019;2(48):204–216. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10220>
10. Zaharov V.L., Zubkova T.V., Shchuchka R.V., Gogmachadze G.D., Vinogradov D.V. [Agroecological Assessment of the Degree of Degradation of Meadow-Chernozem Soil in Apple Orchards on the Example of the Federal State Unitary Enterprise “Michurinskoye” of the Tambov Region]. *AGROEKOINFO*. 2023;3. (In Russ.) Available at: https://www.agroecoinfo.ru/TEXT/RUSSIAN/2023/st_316_annot.html (accessed 25.04.2024).
11. Ushakov R.N., Ruchkina A.V., Elizarov A.O. On the Issue of Information Management of Soil Fertility. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2021;13(3):85–92. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **TKEEGZ**
12. Bunin A.A., Lisovskaia Yu.S., Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Shostak M.M. Agroecological Assessment of Agrarian Land use as a Basis to Increase its Sustainability. *Bulletin of KSAU*. 2021;4(169):80–86. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-80-86>
13. Milyutkin V.A., Kanaev M.A. [Technical Means of Soil Fertility Monitoring and Effectiveness of Differentiated Soil Fertilization under the Conditions of Precise Farming]. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2017;2(64):92–95. (In Russ.) EDN: **YMXGUJ**
14. Utkin A.A. Monitoring of Fertility and Ecotoxicological Condition of Reference Sites of Sod-Podzolic Soils of the Ivanovo Region. *Agrohimiya*. 2023;4:19–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0002188123040130>
15. Voloshenko I.V. Geoecological Assessment of Treated Soils. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*. 2023;4:32–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17513/use.38021>

16. Aleksahin R.M. Radioactive Contamination as a Type of Soil Degradation. *Eurasian Soil Science*. 2009;12:1487–1498. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **KYGCWP**

17. Okunev G.A., Astafev V.L., Kuznetsov N.A. The Influence of Compacting Effect on the Soil in the Implementation of Energy-Saving Technology. *APK Rossii*. 2017;24(5):1188–1194. (In Russ.) EDN: **ZXVRFD**

18. Dzhaborov N.I., Fedkin D.S., Mihajlov A.S. [Obosnovanie Sistemy Tekhnologicheskikh Processov Vosstanovleniya Neobrabatyvaemykh Zemel' v Usloviyah Povyshennogo Uvlazhneniya]. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2014;5(10):66–68. (In Russ.) EDN: **TAQOXH**

19. Dzhaborov N.I., Dobrinov A.V., Fedkin D.S. Agroecological Principles of Zonal Soil Tillage System Development. *Regionalnaya Ekologiya*. 2015;5(40):23–27. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **VDWGMZ**

20. Derzhavin L.M., Fried A.S. [On Complex Assessment of Fertility of Arable Lands]. *Agrochemistry*. 2001;9:5–12. (In Russ.) EDN: **VLZVGZ**

21. Maksimov D.A., Valkama E., Minin V.B., Ranta-Korhonen T., Zakharov A.M. Organic Project: Early Results. *AgroEcoEngineering*. 2020;4(105):101–113 (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **FEVOAU**

Об авторах:

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

Мишанов Алексей Петрович, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9838-5508>, amishanov@mail.ru

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

Заявленный вклад авторов:

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

А. П. Мишанов – расчет и анализ показателей, формулировка выводов.

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

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 15.05.2024; поступила после рецензирования 12.07.2024;
принята к публикации 19.07.2024*

*About the authors:*

Nozim I. Jabborov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, 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, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Aleksei P. Mishanov, Senior 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, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9838-5508>, amishanov@mail.ru

Aleksandr V. Dobrinov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior 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, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Anatoliy P. Savelyev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, 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

Authors contribution:

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

A. P. Mishanov – calculation and analysis of indicators, formulation of conclusions.

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

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 15.05.2024; revised 12.07.2024; accepted 19.07.2024