

ГРНТИ 68.05.45

DOI: 10.51886/1999-740X_2026_1_100

А.А. Курманбаев^{1*}**МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ КАЧЕСТВА И ЗДОРОВЬЯ ПОЧВЫ**

¹Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии
имени У.У. Успанова, 050060, Алматы, ул. Байрак, 10, Казахстан,

*e-mail: wberel@gmail.com

Аннотация. В статье представлен обзор известных и современных микробных индикаторов качества почвы. Основное внимание уделено предикативным и информативным тестам качества и здоровья почв. Даны формулы суммарной оценки плодородия почв по тестам биологической активности. Индексы сгруппированы в 4 группы: индексы углеродного управления (СМИ), структурные и динамические характеристики микробных сообществ, индексы ферментативной активности (TEI, BIF, GMea, BA12), стехиометрические и другие показатели. Обсуждаются перспективы цифровизации почвенно-микробиологических исследований, которые могут повысить надёжность предсказаний изменений плодородия и позволят формировать практико-ориентированные рекомендации для землепользователей.

Ключевые слова: микробные индикаторы, здоровье почвы, плодородие почвы, биологическая активность почв, ферментативная активность почв.

За последнее время растёт интерес к быстрым, воспроизводимым и информативным индикаторам качества почвы для обнаружения изменений её качества и здоровья.

В соответствии с подходом Корнельского университета, здоровье почвы определяется как её способность функционировать в качестве живой экосистемы, обеспечивающая устойчивость агроэкосистем и биологическое разнообразие [1]. Такой подход позволяет учитывать не только химические и физические свойства почвы, но и биологические показатели, (активность микробиоты), содержание органического углерода.

Создание и поддержание плодородия почвы, как известно, определяется деструктивной активностью микрофлоры, существует острая потребность в индикаторах на основе микроорганизмов или их активности.

Интенсификация использования почвы в сельском хозяйстве создает угрозу необратимой потери качества почвы. Негативные изменения приводят к снижению плодородия почвы. В то

же время, практика различных подходов по устойчивому землепользованию показала, что для оценки «качества почвы» не хватает подходящих микробиологических индикаторов.

Микроорганизмы играют ведущую роль в развитии и сохранении почвы. Взаимосвязь микроорганизмов с физической средой в процессе разложения мертвых растительных остатков является частью процесса саморегуляции сохранения текущего плодородия почвы.

Однако, в ряде работ не было обнаружено негативного воздействия интенсификации сельского хозяйства на микроорганизмы почвы [2, 3].

Причина этого обусловлена тем, что комплекс почвенных микроорганизмов обладает высокой степенью функциональной избыточности и высокой степенью приспособляемости к неблагоприятным факторам среды.

Любое воздействие на окружающую среду, которое повлияет на членов микробного сообщества, должно быть обнаружено на уровне сообщества по изменению определенной общей

активности микробного сообщества, которая может быть количественно определена. В почвенной микробиологии имеется ряд тестов суммарной биологической активности почв: FDA test, целлюлозолитическая активность, дыхание, нитрифицирующая активность, азотфиксация и др. Кроме того, на практике давно используются микробиологические и ферментативные индексы плодородия почв. К этим индексам относятся:

- индексы углеродного управления (СМІ);
- структурные и динамические характеристики микробных сообществ;
- индексы ферментативной активности (TEI, BIF, GMea, BA12);
- стехиометрические и разнообразные показатели (C:N, Q_{min} , Shannon, Chao1).

Индексы углеродного управления.

T. Anderson [4] полагает, что с увеличением степени разнообразия микрофлоры почвы следует ожидать меньшего дыхания сообщества. Для этого используют индикатор - микробный метаболический коэффициент, который отражает отношение микробного дыхания к микробной биомассе, показывая эффективность использования углерода микроорганизмами. Более высокий qCO_2 может указывать на нездоровье почвы и стресс для микроорганизмов, тогда как более низкие значения связаны с улучшением здоровья почвы и эффективным использованием углерода. Если дыхание сообщества низкое, больше углерода будет доступно для производства биомассы, что должно отражаться в высоком процентном содержании микробного углерода (C_{mic}) в общем органическом углероде (C_{org}). Было обнаружено, что микробные сообщества систем долгосрочного севооборота энергетически более эффективны (более низкий qCO_2) с соответствующим более высоким значением $C_{mic}: C_{org}$ (увеличение биомас-

са) по сравнению с монокультурами. Автор считает, эти два параметра вместе могут быть индикаторами качества почвы. Физиологические характеристики, такие как удельное дыхание (qCO_2) вместе с $C_{mic}: C_{org}$, можно использовать для характеристики «базовой производительности» микробного сообщества определенной категории почвы, что может привести к «экофизиологическому профилю» участка. Необходимое требование исследования заключается в определении естественных отклонений таких параметров. При этом сильное отклонение этих индикаторов от базового значения, специфичного для данного участка, будет свидетельствовать об изменении окружающей среды и образовании нового почвенного сообщества.

Среди известных индикаторов качества почвы - фракция перманганат окисляемого углерода, которая наиболее тесно связана с фракцией углерода микробной биомассы. В работе [5] она была охарактеризована как лучший предиктор качества почв агроландшафтов.

Микробные индексы

Данная группа индексов позволяет оценить состояние почв, продуктивность, устойчивость и биологическое здоровье агроэкосистем. Индексы в настоящее время широко используются в оценке микробиологического и биохимического статуса почв как в естественном состоянии, так и при различных видах земледелия и степени деградации почв.

Для оценки изменения направленности микробиологических процессов трансформации органического вещества используется коэффициент трансформации органического вещества (Пм) [6], показывающий направленность процессов гумусообразования. Его рассчитывают по формуле: $Пм = (МПА + КАА) \times (МПА/КАА)$, где Пм - коэффициент трансформации органического

вещества, МПА – количество микроорганизмов аммонификаторов, КАА – численность микроорганизмов, использующих минеральные формы азота.

Чевердин А.Ю. с соавт. [7] использовали данный коэффициент для оценки эффективности биопрепаратов на основе ризобактерий в условиях Центрального Черноземья, в полевом опыте на черноземе сегрегационном среднегумусном тяжелосуглинистом с яровым ячменем. Установлено, что предпосевная инокуляция семян ассоциативными штаммами почвенных ризобактерий оказывала влияние на численность основных физиологических групп микробного ценоза. В большей степени активизировалась деятельность аммонификаторов, минерализаторов гумуса, микромицетов, целлюлозолитиков, в меньшей – актиномицетов и нитрификаторов.

Расчетный коэффициент трансформации органического вещества показал стабилизацию процессов гумусонакопления под воздействием инокулянтов. При этом ризобактерии снижали негативный эффект азотного удобрения в черноземе сегрегационном и усиливали процессы гумусонакопления.

Подводя итоги изменения структуры микробного ценоза, можно отметить существенную роль биопрепаратов на основе ассоциативных ризобактерий в активизации микробиологической активности чернозема обыкновенного. Установлена довольно тесная корреляционная зависимость между отдельными группами микроорганизмов и обеспеченностью растений ярового ячменя биогенными элементами питания.

Масютенко Н.П. с соавт. [8] предложили подход оценки качества почв в динамике по трем составляющим: плодородию почвы (13 показателей), здоровью почвы (5 тестов), устойчивости

почвы к антропогенным воздействиям (3). Используются критерии изменения показателей плодородия почвы по отношению к контролю или к начальному состоянию по 4-м уровням: первый – уменьшение, второй – сохранение на прежнем уровне, третий – значимое увеличение ($> \text{НСР}_{05}$), четвертый – высокое значимое увеличение ($\geq 1,3 \cdot \text{НСР}_{05}$).

Для проведения дифференцированной и комплексной оценки агротехнологий по состоянию здоровья почвы представлены частные критерии оценки для 5 показателей: содержание гумуса; микробной биомассы; баланса гумуса; содержание углерода негумифицированного органического вещества почвы, в % от органического углерода почвы; токсичность почвы. Сравнивая три агротехнологии: 1. агротехнология – общепринятая для региона; 2. агробиотехнология-1, включающая обработку биопрепаратами семян, почвы перед посевом, посевов 2 раза, измельченной побочной продукции после уборки урожая и заделку её в почву; 3. агробиотехнология-2 включает агробиотехнология-1 + 10 кг д.в. N на 1 т измельченной побочной продукции, авторы установили, что агробиотехнологии оказали на здоровье почв отличное влияние по сравнению с контролем.

Следующим информативным тестом является индекс биогенности – отношение количества бактерий к грибам. Это один из ключевых микробных индексов, который используется для оценки биологического состояния почв, особенно в контексте почвенного плодородия, воздействия землепользования и экологического мониторинга.

Изменения В/Ф отражают направленность почвенных процессов – от быстрой минерализации к устойчивому накоплению органического вещества. de Vries et al. [9] показали, что в агроэкосистемах с интенсивной обработкой почвы наблюдается $V/F > 2$, в то время

как в естественных луговых почвах этот индекс составляет 0,5–0,9. Согласно Joergensen & Wichern [10] внесение компоста и снижение обработки почвы способствуют увеличению грибной биомассы, снижая В/Ф с 1,8 до 0,8 за 3 года. Bardgett & van der Putten [11] подчеркивают, что высокое значение В/Ф связано с нестабильностью углеродного пула, тогда как грибное доминирование способствует долгосрочному хранению углерода [12].

Таким образом, в рамках агроэкосистем: обработка почвы, минеральные удобрения и пестициды часто увеличивают долю бактерий, а в органическом земледелии и сидерации усиливается развитие грибов и происходит снижение В/Ф. В лесных и целинных почвах преобладает грибной компонент, отношение В/Ф низкое. Эти почвы устойчивы к деградации, с высоким потенциалом углеродного накопления. В отношении углеродного цикла отмечено, что грибы более эффективно перерабатывают сложные соединения (лигнин, целлюлозу) и участвуют в долговременном хранении углерода. Бактерии перерабатывают быстро доступные соединения, вызывая быстрый углеродный оборот. В Экологическом мониторинге рост В/Ф может быть признаком деградации почвы.

Другой информативной группой индексов являются ферментативные тесты, позволяющие дать оценку состояния плодородия почв и качества органического вещества.

В оценке систем удобрений на дерново-подзолистой почве Беларуси использовали ферментативную диагностику по гидролазам (инвертаза и уреазы) и оксидазам (ПФ/ПО), что позволило дать оценку интенсивности процессов минерализации и гумификации в зависимости от системы удобрения. Активность ферментов выражали в относительных единицах (%) по отношению к контролю. При этом

общую активность гидролаз рассматривали как минерализующую способность почвы. Аналогично, активность оксидаз как гумифицирующую активность. Установлено, что на фоне внесения $N_{60}P_{70}K_{120}$ минерализация составила 144%, тогда как гумификация 128%, что указывает на сдвиг в сторону потерь органического вещества. При 125% компенсации выноса фосфора и калия и дробном внесении азотных удобрений $N_{84}P_{70}K_{120}$ было получено оптимальное сохранение плодородия почв за счет баланса процессов минерализации и гумификации (137 и 135% соответственно) и обеспечена высокая продуктивность зернотравяного севооборота (81,7 ц к.ед./га).

Таким образом, биохимическая диагностика позволила оценить направленность изменения плодородия почв при разных системах удобрений [13].

Польские исследователи предлагают применять следующие индексы:

Биологический индекс плодородия BIF (Biological Index Fertility)

$$BIF = \frac{1.5DEH + 100kCAT}{2},$$

где, k индекс пропорциональности, равный 0,01, DEH – дегидрогеназа, CAT – каталаза.

При расчете среднегеометрической ферментативной активности (GMea) сначала рассчитываются относительные баллы активности отдельного фермента по формуле:

$$A1 = \frac{A_{оп}}{A_{контр}} \times 100\%,$$

где $A_1, A_2...A_n$ – относительные баллы для каждого показателя активности фермента, %;

$A_{оп}$ – в опыте

$A_{контр}$ – в контроле

Затем определяют среднегеометрическую активность исследуемых ферментов:

$$GMea = \sqrt[n]{A1 \times A2 \times \dots \times An}$$

GMea позволяет определить в комплексе отклик ферментов разных классов, что позволяет дать оценку происходящих в почве процессов трансформации органического вещества почв [14].

BIF и GMea отражают состояние плодородия и качества органического вещества

Общий уровень энзиматической активности (Total Enzyme Activity Index). Индекс TEI оценивает общую ферментативную активность почв, коррелируя с содержанием углерода и азота

$$TEI = x_i/X_i,$$

где x_i - активность почвенного фермента i , X_i - средняя активность фермента i во всех образцах.

Биохимическая активность почвы (БА12) была предложена на основе активности почвенных ферментов и содержания общего органического углерода:

$$BA12 = \log_{10} \text{TOC} \sqrt{\text{DEH} + \text{CAT} + \text{AIP} + \text{AcP}}$$

BA12 основан на содержании TOC (Total organic carbon) и активности ферментов (дегидрогеназа, каталаза и фосфатазы); тест определен как наиболее чувствительный к изменению качества органического вещества [15].

Koręć & Piotrowska [16] разработали биохимический индекс плодородия почвы для сравнения влияния органических и минеральных удобрений. Этот показатель позволил классифицировать плодородие почвы по четырем категориям (3-4 - низкое плодородие; 4-5 - среднее; 5-6 - высокое; 6-7 - очень высокое плодородие).

Биохимический индекс плодородия почвы

$$(\text{БИП}) = C_{\text{org}} + N_{\text{total}} + \text{DH} + \text{P} + \text{PR} + \text{AM},$$

где C_{org} - содержание органического углерода, %; N_{total} - содержание общего азота, %; DH - активность дегидрогеназы $\text{cm}^3 \text{H}_2 \text{kg}^{-1} \cdot 24 \text{ч}^{-1}$; P - активность фосфатазы, ммоль p -нитрофенилфос-

фата $\text{g}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$; PR - активность протеазы, ммоль $\text{NH}_4\text{-N kg}^{-1} \text{ч}^{-1}$; AM - активность амилазы, мг разложившегося крахмала ч^{-1} .

Эти индексы применяются преимущественно в исследованиях влияния систем обработки почв и удобрений на биологическое состояние.

Последняя группа индексов представлена индексом разнообразия Шеннона, соотношением углерода к азоту, дыхательным коэффициентом и др.

Индекс Шеннона - биоразнообразие бактерий, может рассматриваться как важный предиктор процессов накопления и распада углерода в почве, особенно в контексте оценки биологического разнообразия микробиоты и её функциональной устойчивости.

Индекс Шеннона отражает разнообразие бактериальных сообществ, учитывая как число видов, так и их равномерность.

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \ln(p_i),$$

где S — общее число таксонов (например, видов или OTU – операционных таксономических единиц), p_i - относительная доля i -го таксона в сообществе.

Бактериальное разнообразие, выраженное через индекс Шеннона, отражает как видовую насыщенность, так и равномерность распределения таксонов. Высокие значения индекса свидетельствуют о сложной, устойчивой структуре микробного сообщества, способной обеспечивать стабильность углеродного цикла за счёт повышенной функциональной избыточности. Это способствует как накоплению органического углерода в форме метаболитов и гумусовых веществ, так и снижению темпов его минерализации.

Исследования показывают, что индекс Шеннона бактерий может также

выступать надёжным биоиндикатором состояния почвы в аспекте углеродного баланса. Так, в ряде работ установлено, что высокое бактериальное разнообразие положительно коррелирует с содержанием стабильных органических форм углерода [17-19]. В условиях агроэкосистем увеличение индекса Шеннона ассоциируется с ростом доли устойчивых органических соединений и более медленным разложением органических остатков.

Таким образом, индекс Шеннона представляет собой значимый предиктор как процессов накопления, так и потерь углерода в почве и может использоваться в практике экологического мониторинга, оценки почвенного плодородия и управления устойчивым землепользованием.

Индекс альфа разнообразия Chao1. Позволяет учесть «скрытое» разнообразие, не выявленное при стандартном секвенировании. Чем выше Chao1, тем богаче биоразнообразие. Индекс применяется для оценки микробиома и воды и сравнения экосистем по уровню биоразнообразия [20].

Индекс богатства видов, учитывающий редкие OTU (operating taxonomic units).

$$\text{Chao1} = S_{\text{obs}} + (F1^2/2F2),$$

Где S_{obs} — число наблюдаемых видов, $F1$ — число одиночных видов (встречающихся 1 раз), $F2$ — число двойных видов (встречающихся 2 раза).

Попутниковой Т.О. (2010) для обобщения данных, полученных по микробным тестам предложена формула расчета индекса трансформации биологических свойств почв (ИТБ), характеризующий степень разнонаправленных отклонений совокупности биотических показателей в исследуемых пробах от фоновых значений по формуле:

$$\text{ИТБ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C}{i-1} - \frac{C}{C_{\text{фон}}}}{n},$$

где C - абсолютное значение показателя, $C_{\text{фон}}$ - фоновая величина. Расчет ИТБ произведен по кратностям отклонения биологических показателей от фоновых величин (как в положительную, так и в отрицательную стороны) по формуле, отражающей суммарную степень отклонения биологического отклика от фона в диапазоне значений от 0 до 1. Согласно автору 30%-ная потеря естественного (биологического) состояния почвы, рассчитанная по суммарному индексу трансформации биологических свойств может быть принята за пороговое значение экологического качества почвы, поскольку при таком значении почва не утрачивает способность к самовосстановлению [21].

Карягина Л.А. [22] в своей монографии использовала относительно простой комплексный метод оценки биологической активности почвы в относительных величинах. Суть метода заключается в том, что по каждому биологическому показателю дается относительная оценка его изменения по уровням плодородия. При этом за 100 принимается наибольший показатель. Относительные величины всего комплекса биологических характеристик суммировали по каждому уровню отдельно и выводили окончательную оценку на основе полученных величин.

Никитина З.И. [23] для оценки тестов биологической активности почв предлагает использовать параметр – функция желательности, которая позволяет преобразовать реальный параметр в безразмерный, а затем давать обобщенные характеристики почвы по ряду показателей биологической активности:

$$d_i = N_i / N_k,$$

где N_i – показатель в опыте, N_k – показатель в контроле, для $N_i < N_k$ и для $N_i > N_k$

$$d_i = 1 - N_i / 100 N_k$$

При этом d_i значения располагаются в интервале от 0 до 1:

0,0-0,2 - неприемлемое значение,

0,2-0,4 - плохое

0,4-0,6 - удовлетворительное

0,6-0,8 - хорошее

0,8-1,0 - идеальное

В заключении необходимо сказать, что предлагаемые индексы необходимо применять творчески, исходя из текущих факторов и условий исследования. На микробные индикаторы существенно влияют климатические условия, тип почвы, уровень увлажнения, содержание органического вещества, а также агротехнические мероприятия. Использование минеральных удобрений, пестицидов, интенсивная обработка почвы могут снижать микробную активность и изменять структуру микробного сообщества.

С другой стороны, применение органических удобрений, сидератов и минимальной обработки способствует восстановлению микробного баланса и повышению биологической активности.

Микробные индикаторы играют ключевую роль в оценке эффективности агротехнологий, направленных на устойчивое земледелие. Например, увеличение численности актиномицетов и азотфиксирующих бактерий наблюдается при применении сидератов и минимальной обработке почвы.

В органическом земледелии микробные индексы используются для оценки биологической активности почвы без применения химических удобрений. Это позволяет формировать стратегии управления почвенным плодородием, ориентированные на восстановление микробного баланса.

Несмотря на широкое применение, микробные индикаторы имеют ряд ограничений. Некоторые из них чувствительны к сезонным колебаниям, другие - к типу почвы и уровню увлажнения. Например, индекс дыхательной

активности может быть завышен в условиях временного переувлажнения, не отражая реального состояния микробного сообщества.

Для повышения точности оценки предлагается использовать комплексные индексы, объединяющие микробиологические, биохимические и физико-химические параметры. Это позволит минимизировать влияние внешних факторов и повысить достоверность мониторинга.

С развитием цифровых технологий появляется возможность автоматизированной интерпретации микробных данных. Искусственный интеллект и машинное обучение позволяют выявлять скрытые закономерности в микробных сообществах и прогнозировать изменения качества почвы. Разработка портативных биосенсоров и мобильных приложений позволяет проводить экспресс-тесты в полевых условиях - например, для оценки микробной активности почвы или выявления патогенов на фермах в режиме онлайн. Цифровизация обеспечит повышение точности и скорости диагностики, упрощение хранения и передачи данных, возможность удаленного мониторинга, снижение затрат на лабораторные исследования и расширение доступа к тестированию в отдалённых регионах.

Платформы, такие как Open Soil Index и Soil Health Institute, уже интегрируют микробные данные в цифровые модели оценки плодородия. В Казахстане перспективным направлением является создание национальной базы микробных индикаторов, адаптированной к почвенно-климатическим условиям страны. Так, международная команда инженеров и учёных разрабатывает платформу iAgroInnApp, где реализуется машинная интерпретация индексов микробиологической активности с результатами агрохимических и биологических анализов. Система сопоставляет биологические показатели с

физико-химическими, географическими и климатическими переменными, выявляя драйверы пространственно-временной вариабельности почвенного здоровья. Такой мультимодальный подход повышает надёжность предсказаний изменений плодородия и позволяет формировать практико-ориентированные рекомендации для землепользователей. В перспективе это открывает путь от разрозненных тестов к масштабируемому мониторингу и управлению почвенными экосистемами на уровне хозяйств и регионов [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микробные индикаторы качества почвы представляют собой мощный инструмент экологического мониторинга и управления агроэкосистемами. Их применение позволяет не только оценивать текущее состояние почвы, но

и прогнозировать её устойчивость к антропогенным нагрузкам.

Для повышения эффективности использования микробных индексов необходима стандартизация методик, развитие молекулярных подходов и интеграция данных в цифровые платформы. Междисциплинарный подход, объединяющий почвоведение, микробиологию и агроэкологию, открывает новые горизонты в изучении и сохранении почвенного ресурса.

Приведенные в обзоре индексы качества и здоровья почвы позволят исследователям расширить информативность тестов биологической активности почв, глубже понять направленность почвенных процессов и степень нарушенности почвенных экосистем.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная статья опубликована в рамках программно-целевого финансирования научных исследований Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан на 2024-2026 годы по программе ИРН BR22885097 «Обеспечение рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в интенсивном земледелии на основе новых подходов в сохранении и воспроизводстве плодородия почв».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comprehensive Assessment of Soil Health The Cornell Framework. 2016 by Cornell University. – 134 p.
2. Domsch K.H. The maintenance of soil fertility and the use of pesticides. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*. - 1974. - Vol. 81. - P. 679–682. .
3. Wardle D.A., Yeates G.W., Nicholson K.S., Bonner K.I., Watson R.N. Response of soil microbial biomass dynamics, activity and plant litter decomposition to agricultural intensification over a seven-year period // *Soil Biology & Biochemistry*. - 1999. - Vol. 31. - P. 1707–1720.
4. Anderson T.-H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. - 2003. - Vol. 98. - P. 285–293.
5. Прохоров А.А., Борисов Б.А., Ефимов О.Е. Перманганат-окисляемый углерод как маркер качества почв агроландшафтов // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. - 2024. - Вып. 121. - С. 47–69.
6. Муха В.Д. О показателях, отражающих интенсивность и направленность почвенных процессов. Харьков: Изд-во Харьков. СХИ, 1980. - Т. 273. - С. 13–16.
7. Чевердин А.Ю., Чевердин Ю.И., Турусов В.И. Влияние биопрепаратов на основе ассоциативных бактерий на микробиологическую активность чернозема

сегрегационного // Агрохимия. - 2019. - № 12. - С. 22-31.

8. Методика проведения комплексной оценки воздействия агротехнологий на плодородие, здоровье и устойчивость черноземов [Текст] : брошюра / Н.П. Масютенко, Н.А. Чуян, М.Н. Масютенко, А.В. Кузнецов, Г.М. Брескина. – Курск: ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2024. – 37 с.

9. de Vries, F.T., et al. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. // *Nature*. - 2006. – Vol. 468. – P. 450–453.

10. Joergensen, R.G., & Wichern, F. Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2008. – Vol. 40, № 12. – P. 2977–2991.

11. Bardgett R.D., van der Putten W.H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning // *Nature*. – 2014. – Vol. 515, № 7528. – P. 505–511.

12. Frostegård, Å., Tunlid, A., Bååth, E. Use and misuse of PLFA measurements in soils. // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2011. – Vol. 43, № 8. – P. 1621–1625.

13. Лапа В.В., Михайловская Н.А., Ивахненко Н.Н., Касьянчик С.А., Погирницкая Т.В. Влияние систем удобрения на биологическую активность дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Весці Нацыянальнай Акадэмі Навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. – 2014. – № 2. – С. 61–67.

14. Jaskulska I., Lemanowicz J., Dębska B., Jaskulski D., Breza-Boruta B. Changes in Soil Organic Matter and Biological Parameters as a Result of Long-Term Strip-Till Cultivation // *Agriculture*. – 2023. – Vol. 13, № 12. – Art. 2188.

15. Koper J., Piotrowska A. Application of biochemical index to define soil fertility depending on varied organic and mineral fertilization // *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*. – 2003. – Vol. 6.

16. Delgado-Baquerizo M., Maestre F.T., Gallardo A. et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands // *Nature*. – 2016. – Vol. 502. – P. 672–676.

17. Maestre F.T., Delgado-Baquerizo M., Jeffries T.C. et al. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2015. – Vol. 112, № 51. – P. 15684–15689.

18. Lupatini M., Korthals G.W., de Hollander M. et al. Soil microbiome is more heterogeneous in organic than in conventional farming system // *Frontiers in Microbiology*. – 2017. – Vol. 7. – Art. 2064.

19. SOC mineralization and bacterial alpha-diversity // *Ecological Processes*. – 2023.

20. Попутникова Т.О. Экологическая оценка почв и отдельных компонентов окружающей среды в зоне размещения полигона твердых бытовых отходов : дис. ... канд. биол. наук : 03.00.16, 03.00.27 / Т.О. Попутникова. – М., 2010. – 138 с.

21. Карягина Л.А. Микробиологические основы повышения плодородия почв. – Минск : Наука и техника, 1983. – 181 с.

22. Никитина З.И. Микробиологический мониторинг наземных экосистем. – Новосибирск : Наука, 1991. – 228 с.

23. iAgroInnApp. Personal digital agronomist-soil scientist. [Electronic resource]. – URL: <https://iagroinnapp.com/>.

REFERENCES

1. Comprehensive Assessment of Soil Health The Cornell Framework. 2016 by Cornell University. – 134 p.

2. Domsch K.H. The maintenance of soil fertility and the use of pesticides // *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*. – 1974. – Vol. 81. – P. 679–682.
3. Wardle D.A., Yeates G.W., Nicholson K.S., Bonner K.I., Watson R.N. Response of soil microbial biomass dynamics, activity and plant litter decomposition to agricultural intensification over a seven-year period // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1999. – Vol. 31. – P. 1707–1720.
4. Anderson T.-H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. – 2003. – Vol. 98. – P. 285–293.
5. Prohorov A.A., Borisov B.A., Efimov O.E. Permanganat-okislyaemyj uglerod kak marker kachestva pochv agrolandshaftov // *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*. – 2024. – Vyp. 121. – S. 47–69.
6. Muha V.D. O pokazatelyah, otrazhayushih intensivnost i napravlenost pochvennyh processov. – Harkov : Izd-vo Harkov. SHI, 1980. – T. 273. – S. 13–16.
7. Cheverdin A.Yu., Cheverdin Yu.I., Turusov V.I. Vliyanie biopreparatov na osnove associativnyh bakterij na mikrobiologicheskuyu aktivnost chernozema segregacionnogo // *Agrohimiya*. – 2019. – № 12. – S. 22–31.
8. Metodika provedeniya kompleksnoj ocenki vozdejstviya agrotehnologij na plodorodie, zdorove i ustojchivost chernozemov [Tekst] : broshyura / N.P. Masyutenko, N.A. Chuyan, M.N. Masyutenko, A.V. Kuznecov, G.M. Breskina. – Kursk : FGBNU «Kurskij FANC», 2024. – 37 s.
9. de Vries F.T., et al. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought // *Nature*. – 2006. – Vol. 468. – P. 450–453.
10. Joergensen R.G., Wichern F. Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2008. – Vol. 40, № 12. – P. 2977–2991.
11. Bardgett R.D., van der Putten W.H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning // *Nature*. – 2014. – Vol. 515, № 7528. – P. 505–511.
12. Frostegard A., Tunlid A., Baath E. Use and misuse of PLFA measurements in soils // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2011. – Vol. 43, № 8. – P. 1621–1625.
13. Lapa V.V., Mihajlovskaya N.A., Ivahnenko N.N., Kasyanchik S.A., Pogirnickaya T.V. Vliyanie sistem udobreniya na biologicheskuyu aktivnost dernovo-podzolistoj supeschanoj pochvy // *Vesci Nacyanalnaj Akademi Navuk Belarusi. Seryya agrarnyh navuk*. – 2014. – № 2. – S. 61–67.
14. Jaskulska I., Lemanowicz J., Debska B., Jaskulski D., Breza-Boruta B. Changes in soil organic matter and biological parameters as a result of long-term strip-till cultivation // *Agriculture*. – 2023. – Vol. 13, № 12. – Art. 2188.
14. Koper J., Piotrowska A. Application of biochemical index to define soil fertility depending on varied organic and mineral fertilization // *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*. – 2003. – Vol. 6.
16. Delgado-Baquerizo M., Maestre F.T., Gallardo A. et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands // *Nature*. – 2016. – Vol. 502. – P.672–676.
17. Maestre F.T., Delgado-Baquerizo M., Jeffries T.C. et al. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2015. – Vol. 112, № 51. – P. 15684–15689.
18. Lupatini M., Korthals G.W., de Hollander M. et al. Soil microbiome is more heterogeneous in organic than in conventional farming system // *Frontiers in Microbiology*. – 2017. – Vol. 7. – Art. 2064.

19. SOC mineralization and bacterial alpha diversity // Ecological Processes. – 2023.
20. Poputnikova T.O. Ekologicheskaya ocenka pochv i otdelnyh komponentov okruzhayushej sredy v zone razmesheniya poligona tverdyh bytovykh othodov : dis. ... kand. biol. nauk : 03.00.16, 03.00.27 / T.O. Poputnikova. – Moskva, 2010. – 138 s.
21. Karyagina L.A. Mikrobiologicheskie osnovy povysheniya plodorodiya pochv. – Minsk : Nauka i tehnika, 1983. – 181 s.
22. Nikitina Z.I. Mikrobiologicheskij monitoring nazemnyh ekosistem. – Novosibirsk : Nauka, 1991. – 228 s.
23. iAgroInnApp. Personal digital agronomist-soil scientist. [Electronic resource]. – URL: <https://iagroinnapp.com/>.

ТҮЙІН

А.А. Курманбаев^{1*}ТОПЫРАҚ САПАСЫ ЖӘНЕ ДЕНСАУЛЫҚТЫҢ МИКРОБИОЛОГИЯЛЫҚ
КӨРСЕТКІШТЕРІ

¹*Ө.О. Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми зерттеу-институты, 0500060, Алматы, Байрақ көшесі, 10, Қазақстан,*

**e-mail: wberel@gmail.com*

Бұл мақалада топырақ сапасының белгілі және заманауи микробтық көрсеткіштеріне шолу жасалған. Ол топырақ сапасы мен денсаулығының болжамды және ақпараттық сынақтарына бағытталған. Топырақтың биологиялық белсенділік сынақтарына негізделген топырақ құнарлылығын жалпы бағалау формулалары берілген. Индекстер төрт санатқа топтастырылған: көміртекті басқару индекстері (КБИ), микробтық қауымдас-тықтардың құрылымдық және динамикалық сипаттамалары, ферментативті белсенділік индекстері (TEI, BIF, GMea, BA12) және стехиометриялық және басқа да көрсеткіштер. Топырақ микробиологиялық зерттеулерін цифрландыру перспективалары талқыланады, бұл құнарлылықтың өзгеруін болжаудың сенімділігін арттыра алады және жерді басқарушыларға арналған тәжірибеге бағытталған ұсыныстар әзірлеуге мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: микробтық көрсеткіштер, топырақ сапасы, топырақ құнарлылығы, топырақтың биологиялық белсенділігі, топырақтың ферментативті белсенділігі.

SUMMARY

A.A. Kurmanbayev^{1*}

MICROBIOLOGICAL INDICATORS OF SOIL QUALITY AND HEALTH

¹*U.U. Uspanov Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry, 050060, Almaty, Bayraq St., 10, Kazakhstan, *e-mail: wberel@gmail.com*

This article presents an overview of known and modern microbial indicators of soil quality. It focuses on predictive and informative tests of soil quality and health. Formulas for the overall assessment of soil fertility based on soil biological activity tests are provided. The indices are grouped into four categories: carbon management indices (CMI), structural and dynamic characteristics of microbial communities, enzymatic activity indices (TEI, BIF, GMea, BA12), and stoichiometric and other indicators. Prospects for digitalization of soil microbiological research are discussed, which can improve the reliability of fertility change predictions and enable the development of practice-oriented recommendations for land managers.

Keywords: microbial indicators, soil quality, soil fertility, soil biological activity, soil enzymatic activity.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Курманбаев Аскар Абылайканович – главный научный сотрудник отдела плодородия и биологии и почв, д.б.н., профессор, <https://orcid.org/0000-0003-4384-7634>, e-mail: wberel@gmail.com