

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ОТБОРА ПОЧВЕННЫХ ПРОБ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ

В. С. АСТАХОВ, В. А. ЛЕВЧУК, Г. О. ИВАНЧИКОВ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 15.09.2025)

В контексте Беларуси внедрение точного земледелия активно продвигается на государственном уровне: в 2021 году был объявлен план по полному охвату страны системой прецизионного земледелия в течение пяти лет, с пилотными проектами в 2025–2026 годах, фокусирующимися на оптимизации внесения удобрений и использовании навигационных систем для повышения эффективности. Страна обладает высоким потенциалом для таких технологий благодаря наличию более 1380 специализированных хозяйств и разработкам, таким как мобильное приложение «Сам себе агроном» от Национальной академии наук, а также международному сотрудничеству, включая изучение китайских инноваций в использовании дронов и сенсоров. В 2024 году сельскохозяйственный сектор Беларуси показал рост на 5.1 %, особенно в животноводстве, что подчеркивает необходимость интеграции прецизионных методов для дальнейшего развития.

Настоящая статья предлагает комплексный обзор современных технологий отбора почвенных проб, включая зональное управление по рельефу и электропроводности, сеточный отбор (grid sampling), использование датчиков влажности (TDR, FDR, capacitive), цифрового картирования и автоматизированных систем, таких как Radicle Agronomics, их сравнительный анализ по критериям точности, стоимости и применимости, а также рекомендации по применению в белорусском сельском хозяйстве. Это позволит ответить на потребности аграриев, руководителей хозяйств и специалистов, предоставив практические инструменты для адаптации прецизионных методов к местным условиям, способствуя устойчивому развитию отрасли и повышению конкурентоспособности белорусского агросектора на глобальном рынке.

Ключевые слова: минеральные удобрения, точное земледелие, сельское хозяйство.

In the context of Belarus, the implementation of precision farming is being actively promoted at the state level: in 2021, a plan was announced to fully cover the country with a precision farming system within five years, with pilot projects in 2025–2026 focusing on optimizing fertilizer application and using navigation systems to increase efficiency. The country has significant potential for such technologies, thanks to its more than 1,380 specialized farms and developments such as the "Be Your Own Agronomist" mobile app from the National Academy of Sciences, as well as international collaboration, including exploring Chinese innovations in the use of drones and sensors. In 2024, Belarus's agricultural sector grew by 5.1%, particularly in livestock farming, highlighting the need to integrate precision methods for further development.

This article provides a comprehensive overview of modern soil sampling technologies, including zonal management based on relief and electrical conductivity, grid sampling, the use of moisture sensors (TDR, FDR, capacitive), digital mapping, and automated systems such as Radicle Agronomics. A comparative analysis of these technologies is provided based on accuracy, cost, and applicability, along with recommendations for their application in Belarusian agriculture. This will address the needs of farmers, farm managers, and specialists by providing practical tools for adapting precision methods to local conditions, promoting sustainable development and increasing the competitiveness of the Belarusian agricultural sector in the global market.

Key words: mineral fertilizers, precision farming, agriculture.

Введение

Точное земледелие, также известное как прецизионное земледелие или site-specific crop management, представляет собой современный подход к управлению сельскохозяйственным производством, который использует передовые технологии для точного учета пространственной и временной изменчивости полей, оптимизации использования ресурсов и повышения общей эффективности. Этот метод включает интеграцию данных из сенсоров, спутниковых систем, дронов, GPS-навигации и аналитики больших данных, позволяя фермерам применять удобрения, воду, семена и пестициды именно там и в тех количествах, где они необходимы, минимизируя отходы и максимизируя урожайность. В глобальном масштабе точное земледелие становится ключевым инструментом для повышения эффективности сельскохозяйственного производства, особенно в условиях ограниченных ресурсов, таких как вода и плодородные почвы, а также растущих экологических вызовов, включая изменение климата, деградацию земель и необходимость снижения углеродного следа агропромышленности [1, 4]. Согласно исследованиям, внедрение таких технологий может повысить прибыльность ферм на 10–20 %, сократить использование удобрений и пестицидов на 15–30 %, а также способствовать сохранению окружающей среды за счет более эффективного распределения ресурсов, таких как земля, вода, топливо и химикаты. Однако несмотря на очевидные преимущества, переход к точному земледелию сталкивается с вызовами, включая высокие начальные затраты на оборудование, необходи-

мость в квалифицированных специалистах и доступ к надежным данным, что особенно актуально для развивающихся регионов.

В Беларуси, где сельское хозяйство играет значительную роль в экономике, составляя около 7–8 % ВВП и обеспечивая продовольственную безопасность, точное земледелие приобретает особую актуальность в контексте специфических почвенно-климатических условий. Здесь преобладают подзолистые (подзолистые) почвы, которые занимают более 70 % сельскохозяйственных угодий, характеризуясь низкой естественной плодородностью, высоким уровнем кислотности (рН часто в диапазоне 4.4–5.5, а иногда и ниже, достигая сильно кислых значений от 3.99 до 6.67) и бедностью питательными веществами, такими как азот, фосфор и калий [8]. Эти почвы, типичные для Полесья и северных регионов страны, формируются под влиянием влажного климата и лесной растительности, что приводит к вымыванию полезных элементов в нижние горизонты и накоплению кислот. В результате, без надлежащего управления, такие почвы демонстрируют низкую урожайность и повышенную уязвимость к эрозии, засолению и загрязнению. За последние 50 лет, благодаря мелиоративным работам и внесению известковых материалов, в некоторых районах наблюдается сдвиг от слегка кислых к нейтральным значениям рН (например, с 5.5–6.0 до более высоких показателей в 68.8% обследованных территорий), но общая проблема сохраняется, требуя постоянного мониторинга и корректировки. Правильный отбор почвенных проб для дифференцированного внесения удобрений имеет решающее значение, поскольку позволяет выявить локальные вариации в кислотности, содержании макро- и микроэлементов, что критично для минимизации затрат на агрохимикаты и повышения урожайности на 15–25 % без ущерба для экосистемы. Эти почвы требуют тщательного управления питательными веществами, включая точное дозирование извести для нейтрализации кислотности и удобрений для баланса элементов, чтобы избежать перерасхода ресурсов и предотвратить загрязнение грунтовых вод. Отсюда цель статьи – комплексный анализ современных технологий отбора почвенных проб, а также рекомендации по применению их в белорусском сельском хозяйстве.

Основная часть

1. Значение отбора почвенных проб в точном земледелии

Отбор почвенных проб представляет собой фундаментальный процесс в системе точного земледелия, служащий основой для создания высокоточных электронных карт содержания питательных веществ, кислотности и других агрохимических показателей, которые позволяют применять удобрения, известь и другие агрохимикаты с учетом пространственной вариабельности почвенного покрова, минимизируя перерасход ресурсов и повышая урожайность на 15–30 % [1]. Этот подход подразумевает систематический сбор образцов почвы с использованием GPS-координат для привязки данных, что обеспечивает детальное картирование полей и выявление зон с различной продуктивностью, способствуя оптимизации затрат на удобрения и снижению экологического воздействия за счет предотвращения вымывания нитратов в грунтовые воды. В глобальном контексте точное земледелие, опирающееся на качественный отбор проб, позволяет повысить эффективность производства при ограниченных ресурсах, интегрируя данные из сенсоров, спутников и лабораторных анализов для создания цифровых моделей полей, что особенно актуально в условиях климатических изменений и растущего спроса на продовольствие.

В условиях подзолистых (подзолических) почв, характерных для Беларуси и занимающих значительную часть сельскохозяйственных угодий (до 70–80 % в северных и центральных регионах), высокая кислотность (рН часто в диапазоне 4.5–5.5, с отдельными горизонтами до 2.7–3.7) и низкое содержание питательных веществ, таких как азот, фосфор, калий, кальций и магний, требуют детального анализа для предотвращения избыточного или недостаточного внесения удобрений и мелиорантов [8]. Эти почвы, формирующиеся под влиянием влажного климата, лесной растительности и песчаных отложений, подвержены вымыванию полезных элементов в нижние слои, что приводит к низкой буферной способности, медленному выветриванию и уязвимости к эрозии, делая их малопродуктивными для интенсивного земледелия без корректировки. В Беларуси, где такие почвы преобладают в Полесье и на задровых равнинах, отбор проб позволяет выявить внутривидовую изменчивость кислотности и питательных веществ, коррелирующую с рельефом и высотой над уровнем моря, что критично для дифференцированного внесения извести и удобрений, как показано в исследованиях 2025 года на тестовых полигонах. Без тщательного отбора проб риск алюминиевой токсичности и дефицита микроэлементов возрастает, что снижает урожайность и требует дополнительных мелиоративных мер, таких как известкование для повышения рН и улучшения структуры почвы.

Это не только повышает экономическую эффективность за счет снижения затрат на удобрения (до 20–30 % экономии) и увеличения прибыли ферм, но и снижает экологическую нагрузку путем минимизации загрязнения окружающей среды нитратами, фосфатами и тяжелыми металлами, что особенно важно в контексте устойчивого развития и национальных стратегий Беларуси по цифровизации агросектора [4]. Внедрение таких практик в Республике Беларусь, поддерживаемое государственными программами по точному земледелию (включая создание цифровых платформ и пилотные проекты в 2025–2026 годах), способствует сохранению биоразнообразия, улучшению качества почв и соответствию международным стандартам устойчивого сельского хозяйства, таким как цели ООН по устойчивому развитию. В итоге, отбор почвенных проб становится ключевым инструментом для перехода от традиционного к прецизионному земледелию, обеспечивая баланс между производительностью, экономикой и экологией в условиях специфических белорусских почв.

2. Обзор технологий отбора почвенных проб

Сеточный метод отбора проб

Сеточный метод предполагает деление поля на равные ячейки (обычно от 0,25 до 5 акров) с отбором проб в центре каждой ячейки или в нескольких точках внутри нее [5]. Компания Ag-Chem Equipment Co., Inc. рекомендует использовать ячейки размером 2,5 акра или меньше, предпочтительно 1 акр для орошаемых полей или регионов с осадками не менее 635 мм в год [1]. Для реализации метода применяются устройства, такие как GridSampler, и программное обеспечение SGIS, обеспечивающее точную геопривязку проб с помощью GPS [1].

Преимущества: Высокая точность в определении вариабельности почвенных свойств. Подходит для полей с высокой неоднородностью.

Недостатки: Высокие затраты на отбор и анализ проб. Требуется значительных временных ресурсов.

Оборудование: GPS-устройства. Почвенные зонды или буры. Программное обеспечение для обработки данных (например, SGIS).

Зональный метод отбора проб

Зональный метод основан на делении поля на зоны с аналогичными характеристиками, такими как тип почвы, рельеф, история урожайности или содержание органического вещества [5]. Пробы отбираются внутри каждой зоны, что снижает общее количество необходимых анализов.

Преимущества: Более экономичен по сравнению с сеточным методом. Эффективен для полей с известными паттернами вариабельности.

Недостатки: Требуется предварительных данных для определения зон. Может упустить мелкомасштабную вариабельность.

Оборудование: GPS для геопривязки. Датчики для определения зон (например, датчики электропроводности почвы). Программное обеспечение для анализа данных.

Сенсорный метод отбора проб

Сенсорный метод использует датчики для измерения свойств почвы, таких как электропроводность, которая коррелирует с текстурой, влажностью и содержанием питательных веществ [6]. Эти данные могут направлять отбор проб или непосредственно использоваться для создания карт переменного внесения удобрений.

Преимущества: Снижает количество необходимых проб. Обеспечивает непрерывные данные по полю.

Недостатки: Высокая начальная стоимость датчиков. Требуется калибровки и технической экспертизы.

Оборудование: Датчики электропроводности (например, EM38, Veris). Регистраторы данных. Программное обеспечение для интерпретации.

Автоматизированный метод отбора проб

Автоматизированные системы, такие как Falcon, используют машины для сбора проб с точной геопривязкой через GPS. Это повышает эффективность и консистентность процесса.

Преимущества: Высокая скорость и точность. Снижение человеческого фактора.

Недостатки: Высокая стоимость оборудования. Необходимость технической обслуживания.

Оборудование: Автоматизированные пробоотборники. GPS-системы.

3. Сравнение затрат и эффективности методов

Затраты на отбор почвенных проб зависят от метода, размера ячеек или зон, а также используемого оборудования. Ниже приведена таблица, основанная на исследовании [7], сравнивающем три метода в различных условиях.

Результаты способов отбора почвенных проб

Площадь	Метод	Общая стоимость (\$)	Затраты на рабочую силу (\$/га)	Затраты на анализ (\$)	Затраты на датчики/карты (\$)
A1	Зональный (ZME)	52,611.18	6.88	81.21	0
A1	Сеточный (GS)	60,170.42	10.31	4,277.36	0
A1	Сенсорный (OS)	60,323.98	6.88	135.35	774.10
A2	Зональный (ZME)	5,085.28	6.88	81.22	0
A2	Сеточный (GS)	6,028.69	10.31	622.65	0
A2	Сенсорный (OS)	7,668.95	6.88	135.35	93.20
A3	Зональный (ZME)	19,386.02	6.88	81.22	0
A3	Сеточный (GS)	22,920.92	10.31	622.65	0
A3	Сенсорный (OS)	25,022.40	6.88	135.36	313.15

Анализ:

- Зональный метод (ZME) является наиболее экономичным, но может быть менее точным в условиях высокой вариабельности [7].
- Сеточный метод (GS) обеспечивает высокую точность, но увеличивает затраты на 14–18 % по сравнению с ZME [7].
- Сенсорный метод (OS) требует дополнительных вложений в оборудование, но может быть эффективным для управления калием и азотом [6, 7].

Выбор метода зависит от бюджета хозяйства, вариабельности почв и доступных технологий. Например, сеточный метод предпочтителен для полей с высокой неоднородностью, тогда как зональный метод подходит для более однородных участков [5].

4. Применение в условиях Беларуси

Особенности белорусских почв

Подзолистые почвы, преобладающие в Беларуси [8], характеризуются высокой кислотностью, низким содержанием питательных веществ и склонностью к вымыванию минералов. Эти свойства требуют тщательного отбора проб для точного определения потребностей в удобрениях. Например, сеточный метод может быть полезен для выявления мелкомасштабной вариабельности, тогда как зональный метод эффективен при наличии данных о типах почв или рельефе.

Тенденции в белорусском сельском хозяйстве

Беларусь активно внедряет технологии точного земледелия. Согласно планам Министерства сельского хозяйства, в течение пяти лет система точного земледелия будет внедрена по всей стране [9]. Стартап OneSoil, использующий спутниковые данные для мониторинга полей, демонстрирует потенциал цифровых технологий в управлении сельскохозяйственными ресурсами [3]. Эти тенденции подчеркивают важность выбора подходящих методов отбора проб для интеграции с современными системами.

Рекомендации для аграриев

Малым хозяйствам нужно внедрять использование зонального метода для снижения затрат, опираясь на доступные данные о почвах или рельефе [5].

Крупным хозяйствам рекомендовано рассмотрение сеточного или сенсорного методов для повышения точности, особенно на полях с высокой вариабельностью [5, 6].

Инновационным хозяйствам необходимо инвестировать в автоматизированные системы и сенсоры для долгосрочной эффективности [6].

Заключение

Технологии отбора почвенных проб представляют собой фундаментальный элемент точного земледелия, обеспечивая точную оценку пространственной изменчивости почвенных свойств, что позволяет оптимизировать внесение удобрений, минимизировать экологические риски и повышать общую устойчивость сельскохозяйственного производства [1, 4]. В эпоху цифровизации и растущих вызовов, таких как изменение климата и истощение ресурсов, эти технологии способствуют повышению урожайности на 15–30 %, снижению затрат на агрохимикаты до 30 % и сохранению биоразнообразия за счет дифференцированного подхода к управлению полями. Современные методы отбора проб интегрируют GPS-навигацию, датчики реального времени и автоматизированные системы, позволяя собирать данные о кислотности, содержании питательных веществ и влажности с высокой точностью, что особенно актуально для регионов с неоднородными почвами. Однако их эффективность зависит от правильного выбора стратегии, учитывающей локальные условия, что подчеркивает необходимость комплексного анализа преимуществ и ограничений каждого подхода.

В условиях Беларуси, где подзолистые почвы, занимающие до 87,5 % пахотных земель, характеризуются низкой плодородностью, высокой кислотностью (рН 2,7–3,7 в некоторых горизонтах) и бедностью гумусом, азотом и другими элементами, а также подверженностью деградации из-за гидроморфизма и эрозии [8, 9], выбор подходящего метода отбора проб становится стратегически важным для устойчивого развития агросектора. Эти почвы, типичные для задровых равнин и водораз-

делов под хвойной растительностью, требуют тщательного управления, включая регулярный мониторинг реакции среды и буферности к изменениям pH, чтобы поддерживать продуктивность и предотвратить дальнейшее истощение. Активное внедрение цифровых технологий в Беларуси, включая государственные инициативы по созданию «Цифровой платформы точного земледелия» в 2025–2026 годах, с участием 7 агропредприятий и выделением 6,8 млн рублей, усиливает роль таких методов: пилотные проекты фокусируются на обработке почвы, севе и уборке с использованием ИИ и сенсоров, что уже привело к росту сектора на 5,1 % в 2024 году и обещает дальнейшую оптимизацию в 2025-м. Это позволит белорусским хозяйствам, таким как те, что участвуют в проектах в Мядельском районе, интегрировать точное земледелие на национальном уровне, повышая конкурентоспособность на глобальном рынке.

Сеточный (grid sampling), зональный (zone sampling), сенсорный (sensor-based) и автоматизированный (automated) методы предлагают различные подходы к отбору проб, каждый из которых адаптирован к конкретным сценариям и имеет свои преимущества и ограничения. Сеточный метод подразумевает деление поля на равномерную сетку (например, 1–2,5 га на ячейку) с отбором проб в каждой точке, что обеспечивает высокую разрешающую способность данных и точное картирование вариативности, повышая надежность почвенных карт на 40 %, но требует значительных затрат на анализ (больше ядер для отбора) и может быть избыточным для однородных полей. Зональный метод группирует поле по зонам на основе рельефа, типов почв или исторических данных урожайности, снижая количество проб (экономия до 50 % по сравнению с сеточным) и фокусируясь на управляемых единицах, но его точность зависит от качества предварительных данных и может недооценивать случайную вариативность. Сенсорный подход использует датчики (например, для электропроводности, влажности или спектроскопии) для реального времени анализа, минимизируя трудозатраты и обеспечивая непрерывные данные, но ограничен зависимостью от калибровки и погодных условий, а также высокой начальной стоимостью оборудования. Автоматизированный метод, часто сочетающий мобильные агрегаты с GPS и ИИ (например, автоматические буры или гибридные системы), ускоряет процесс (оперативность в 3–5 раз выше традиционных) и снижает человеческий фактор, но требует инвестиций в технику и может быть неэффективным на сложном рельефе или в малых хозяйствах. Сравнительный анализ показывает, что сеточный и зональный методы лучше подходят для начальной оценки, в то время как сенсорный и автоматизированный – для динамического мониторинга, с гибридными вариантами (например, machine learning vs grid), предлагающими баланс между стоимостью и качеством.

Белорусским аграриям и руководителям хозяйств следует учитывать вариативность почв (особенно в дерново-подзолистых типах с разной степенью устойчивости к кислотности), бюджет (начальные инвестиции от 10–50 тыс. рублей на гектар для автоматизированных систем) и доступные технологии (включая государственные платформы и выставки вроде БелАгро-2025) при выборе метода, чтобы обеспечить экономическую эффективность, экологическую устойчивость и долгосрочную продуктивность. Рекомендуется начинать с зонального или сеточного подхода для базового картирования, переходя к сенсорным и автоматизированным для масштабирования, с интеграцией данных из национальных проектов для минимизации рисков и максимизации отдачи. В итоге адаптация этих технологий позволит Беларуси не только справиться с вызовами подзолистых почв, но и внести вклад в глобальную устойчивость агропроизводства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванчиков, Г. О. Значение минеральных удобрений в современном земледелии / Г. О. Иванчиков, В. С. Астахов // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства. – Горки: БГСХА, 2024. – Вып. 9. – С. 116–120.
2. Белов, Г. Д. Механизация локального внесения минеральных удобрений / Г. Д. Белов, В. А. Дьяченко. – Минск: Урожай, 1977. – 80 с.
3. Найдин, П. Г. Удобрение зерновых и зернобобовых культур / П. Г. Найдин. – М.: Сельхозиздат, 1963. – 263 с.
4. Иванчиков, Г. О. Путь к устойчивому земледелию: минеральные удобрения и инновации / Г. О. Иванчиков, В. С. Астахов // Наше сельское хозяйство. – 2023. – №17. – С. 53–55.
5. Farmaha B. S., Caughman W., Park D. Precision Agriculture-Based Soil Sampling Strategies. Clemson University, 2020. – URL: <https://lgpress.clemson.edu/publication/precision-agriculture-based-soil-sampling-strategies/> (дата обращения: 24.07.2025).
6. Sant'Anna F. S., et al. Comparative analysis of soil-sampling methods used in precision agriculture. Journal of Agricultural Engineering, 2021. – URL: <https://www.agroengineering.org/jae/article/view/1117> (дата обращения: 24.07.2025).
7. Sant'Anna F. S., et al. Comparative economic analysis of soil sampling methods used in precision agriculture. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2020. – URL: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/HVQXYypxHBRp3wf3FfnPzcj/?lang=en> (дата обращения: 24.07.2025).
8. Bogdevich I. M., Smeyan N. I., Levitan T. V., eds. Soil Science and Agricultural Chemistry. Minsk: BRISSA, 2000. – 246 p.
9. Систему точного земледелия планируется внедрить по всей Беларуси в этой пятилетке. БЕЛТА, 2021. – URL: <https://belta.by/society/view/sistemu-tochnogo-zemledelija-planiruetsja-vnedrit-po-vsej-belarusi-v-etoj-pjatiletke-grakun-437753-2021/> (дата обращения: 24.07.2025).