**ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ**

УДК 631.58:634.8

**Б.У. Сулейменов[1], С.И. Танирбергенов[1]**

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ: ОБЗОР

*[1]Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии им. У.У. Успанова, 050060, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 75 В, Казахстан, e-mail: beibuts@mail.ru*

*Аннотация.* Точное земледелие - новый этап развития агросферы, связанный с использованием геоинформационных систем. В настоящие время спутниковые снимки с высоким разрешением более широко используются для изучения в сельском хозяйстве, что является инновацией для Казахстана при реализации задач точного земледелия. Тем не менее, наличие и часто непомерно высокие затраты на такие изображения предполагают альтернативный продукт для этого конкретного приложения в точном земледелии. В частности, изображения, сделанные платформами дистанционного зондирования с малой высотой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), являются потенциальной альтернативой, учитывая их низкую стоимость эксплуатации в мониторинге окружающей среды, высоком пространственном и временном разрешении, и их высокой гибкости при захвате изображений, программировании. В мире было проведено несколько исследований по применению изображений БПЛА для точного земледелия. Результаты этих исследований указывают на то, что для обеспечения надежного конечного продукта для фермеров необходимы успехи в разработке платформ, производстве, стандартизации геопривязки изображений, а также в процессе обработки информации.

*Ключевые слова:* точное земледелие, беспилотные летательные аппараты, ГИС технологии.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в США и странах Европы быстрыми темпами развивается и все более широко внедряется в производство так называемое «точное земледелие» (ТЗ), отличительной чертой которого является локальная дифференциация агротехнических воздействий с учетом пространственной вариабельности почвенных и иных факторов формирования урожая в пределах отдельного сельскохозяйственного поля [1].

Одной из уникальных характеристик этой отрасли является то, что она обеспечивает биологические продукты, которые чрезвычайно чувствительны как к условиям окружающей среды, так и к методам управления [2]. Поэтому крайне важно, чтобы фермеры своевременно знали, где существуют вариации в своих областях, с тем чтобы соответствующим образом скорректировать их практику. Следовательно, любые методы, которые способствуют стабилизации или увеличению сельскохозяйственного производства при опосредовании воздействия этой деятельности на окружающую среду, будут полезны для общества. Например, датчики, способные обнаруживать изменчивость поля, такие как технология дифференцированного внесения удобрений (ТДВУ- англ. Variable Rate Technology (VRT)) и мониторы урожая зерна были использованы в сочетании с высокой точностью GPS положения для решения этих проблем [3, 4]. Такие системы подпадают под сферу ТЗ, регулирование посевов на конкретных участках или даже сельское хозяйство, ориентированное на конкретные объекты. Эти термины предполагают, что управление сельским хозяйством может быть осуществлено с определенной степенью точности. Следовательно, ТЗ

предоставляет альтернативные и реалистичные средства для сокращения и оптимизации использования потенциально опасных соединений и, таким образом, может способствовать созданию более здоровой окружающей среды для людей. Несмотря на то, что в ТЗ есть некоторые ключевые проблемы, которые необходимо решать, включая отсутствие надлежащих систем поддержки принятия решений и недостаточное признание временных изменений и экологического аудита [5].

С развитием новых чувствительных технологий и все более широким применением ТЗ в настоящее время разрабатывается большое количество сельскохозяйственной техники, которая все более усложняется. Сегодня ТДВУ является самой передовой областью ТЗ. Тем не менее, оперативный успех ТДВУ требует точных карт роста сельскохозяйственных культур, сорняков, заражений насекомыми, недостатков питательных веществ в растениеводстве и других сельскохозяйственных и почвенных условий [6]. Эти данные необходимы для сопоставления питательных веществ (и других операций) с пространственной изменчивостью сельскохозяйственных культур [7, 4].

Таким образом, в краткое время позволяют оперативно реагировать на неблагоприятные урожаи или полевые условия. С нынешней тенденцией к увеличению размера фермы также становится более дорогостоящим приобретать более крупные наборы данных для оценки изменчивости полей. Спутниковые изображения и аэрофотоснимки, собранные в течение вегетационного периода, использовались для мониторинга роста сельскохозяйственных культур, повышения урожайности и прогнозирования урожая сельскохозяйственных культур [3, 8], но до сих пор их использование было ограничено плохим временем пересмотра и/или грубые пространственные разрешения [3, 6]. Кроме того, использование пилотируемых бортовых платформ ограничено высокой эксплуатационной сложностью, затратами и длительной доставкой продуктов [6, 9-11]. В связи с недавними технологическими достижениями в области аэрокосмической техники, системой дистанционного зондирования с низкой высотой, относительно новая концепция получения изображений поверхности Земли на малой высоте с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [2], альтернативная платформа для этой цели. Сверхвысокое пространственное разрешение (например, сантиметры), относительно низкие эксплуатационные расходы и получение изображений в режиме реального времени [11-16] означают, что эти платформы являются идеальными инструментами для картографирования и мониторинга в ТЗ. Цель этого обзора - дать представление об этих конкретных устройствах путем определения применения дистанционного зондирования в ТЗ и изучения использования и ограничений БПЛА в мониторинге окружающей среды и ТЗ. Кроме того, обсуждаются потенциальные успехи и альтернативные виды использования БПЛА, что может помочь облегчить их использование и привлечь интерес фермеров к их применению в ТЗ.

*Дистанционное зондирование и точное земледелие*

Основными этапами практики ТЗ являются сбор данных, картирование изменчивости полей, принятие решений и наконец, практика управления. Предполагается, что дистанционное зондирование может быть задействовано в первых трех из этих этапов [3, 8]. В частности, крайне важно получать обновленные изображения/карты во время процесса принятия решений, по-

этому изменчивость поля может отображаться с использованием изображений с дистанционным зондированием.

Экологическое дистанционное зондирование, по существу, использует лучистую энергию для извлечения информации о наземных характеристиках вдоль крупных участков валков в течение короткого периода времени. Дистанционное зондирование наряду с другими геопространственными методами было применено в сельском хозяйстве с 1950-х годов [17]. Тем не менее, более раннее использование аэрофотоснимков в 1930-х годах Администрацией сельского хозяйства США для точных измерений пахотных земель также было за документировано [18]. Основная основополагающая предпосылка применения дистанционного зондирования в ТЗ заключается в том, что различия в уровне роста сельскохозяйственных культур и состоянии почвы можно обнаружить с помощью вариаций спектральных каналов [8]. В частности, изменения в отражательной способности дистанционного зондирования могут быть обнаружены до того, как симптомы, такие как грибковые и плесневые инфекции, станут видимыми для человеческого глаза [19].

Общие платформы дистанционного зондирования включают спутники, самолеты, воздушные шары и вертолеты, а на этих платформах для дистанционного зондирования установлены различные датчики, такие как оптические и ближние инфракрасные датчики и RADAR (RAdio Detection and Ranging). Диагностическая информация, полученная из изображений, собранных с этих бортовых датчиков, таких как биомасса, индекс листовой поверхности (LAI), заболевание, стресс и нехватка воды, может, таким образом, помочь в управлении культурами, прогнозировании урожайности и защите окружающей среды.

Общие сельскохозяйственные применения с использованием дистанционного зондирования включают мониторинг и картографирование свойств почв [20, 21], классификацию видов растений [22], вредители культур [23], определение стрессовых вод [24], анализ химического состава листьев [25] и контроль от сорняков [26]. Многие виды культур отслеживались с использованием методов дистанционного зондирования включая рапс, кукурузу, хлопчатник и пшеницу [8, 27, 28]. Аэрофотосъемка использовалась при отображении урожайности для определения вариации поля [29], но большинство изображений, используемых в этих исследованиях, либо являются гиперспектральными [20, 29], спутниковыми гиперспектральными [22] или спутниковыми мультиспектральными [21, 30]. Кроме того, гиперспектральные методы с близкого расстояния были также использованы для изучения спектральных откликов полевого купола [21, 22, 28, 31]. На сегодняшний день доминирующие дистанционно отобранные изображения для ТЗ были оптическими. Однако недавно было показано, что снимки с использованием радара синтезированной апертурной решеткой (SAR) полезны для картографирования и оценки посевных культур, обработки почвы и картографирования вылова, оценки влажности почвы, прогнозирования урожайности и управления зонами [32]. Ограниченное применение изображений SAR в сельском хозяйстве, скорее всего, связано с затратами, сроками и интерпретацией этих данных [32].

По сравнению со спутниковыми изображениями, полученные БПЛА изображения обычно имеют более высокие временные (например, ежедневные приобретения) и более высокие разрешения по пространству (например, сантиметры). По изображению с

высоким разрешением, было проведено много исследований, посвященных изучению условий посева, особенно тех, которые связаны с LAI. LAI и является основным параметром купола в двух основных физиологических процессах, фотосинтезе и эвапотранспирации, которые в наибольшей степени зависят от солнечной радиации [8]. Большинство моделей роста урожая и урожайности сельскохозяйственных культур требуют оценки LAI навесов для сельскохозяйственных культур. Другие оценочные измерения с использованием данных дистанционного зондирования включают поверхностные свойства почвы [33], водный стресс [34], растительный покров [35], содержание азота [9, 36, 37], высота посевов [38], над наземной биомассой [36], объем сорняков [31] и виды растений [39]. Эти данные также использовались для мониторинга других биологических параметров, таких как содержание (или концентрация) хлорофилла листьев и содержание (или концентрация) азота в листьях с течением вегетаций [3, 10]. Многие из вышеупомянутых параметров определяются с использованием индексов растительности, которые являются одними из наиболее используемых инструментов в области дистанционного зондирования в сельском хозяйстве. В частности, индексы растительности, такие как индекс нормализованной разностной растительности (NDVI), почвенный вегетационный индекс (SAVI) и Green NDVI, широко используются для количественного изучения различных биологических параметров [12, 13]. Однако общей проблемой, возникающей при использовании этих показателей в сельскохозяйственных исследованиях, является насыщение при высоком LAI [40].

Было показано, что применение дистанционного зондирования выгодно [27, 29, 41], но текущие приложения в ТЗ по-прежнему ограничены. Проведенному в США с 2004 по 2009 годы использование спутниковых снимков и аэрофотоснимков в ТЗ увеличилось с 16,1 до 30,3 % [42]. Однако число людей, использующих дистанционное зондирование в технологиях ТЗ, остается довольно небольшим [42]. Ограничения, выявленные для применений систем дистанционного зондирования в управлении фермами, включают: сбор и доставку изображений своевременно, отсутствие данных с высоким пространственным разрешением, интерпретацию изображений и извлечение данных и интеграция этих данных с агрономическими данными в экспертные системы [30]. Например, некоторые конкретные решения управления хозяйством, такие как обнаружение сорняков и управление сорняками, требуют очень высоких изображений пространственного разрешения часто в порядке сантиметров [43]. К сожалению, наиболее доступные данные дистанционного зондирования, спутниковые снимки среднего разрешения (например, Landsat TM, ASTER, SPOT 5), полезны только для крупномасштабных исследований. Более того, даже новейшие спутниковые снимки с более высоким разрешением (напри-мер, KazSAT-1) не могут предоставлять высокочастотные данные для возникновения ситуации (например, мониторинг стресса питательных веществ, болезнь) с ограниченным периодом повторения 1-2 дня. Погодные условия также являются критическим препятствием для приобретения спутниковых снимков, поскольку в вегетационный период также часто является сезоном дождей. В дополнение к фактическим ограничениям датчиков, применение дистанционного зондирования в сельском хозяйстве также ограничено интерпретацией и анализом проблем, которые возникают при работе с очень большими объемами цифровых данных [44]. Более того, ощущается недо-

статок полезности в картировании растущих культур и относительно малонадежных аналитиков дистанционного зондирования или консалтинговых фирм, которые могут заниматься этими продуктами [45]. Наконец, предлагается [45], что одной из основных причин низкой скорости приема изображений дистанционного зондирования в ТЗ является отсутствие надежных экономических оценок возврата от применения изображений с дистанционным зондированием. Некоторые [3, 46] считают, что издержки, доступность, гибкость и обработка удаленных изображений со спутников сделали их приложения запрещающими и, следовательно, непрактичными.

*Применение БПЛА для исследование окружающей среды в системе ТЗ*

Как указано, затраты и доступность спутниковых снимков высокого разрешения часто ограничивают их применение в ТЗ [25]. Следовательно, БПЛА может быть недорогой и более практичной заменой для спутниковых и авиационных самолетов большой дальности для данных дистанционного зондирования с высоким разрешением. Кроме того, БПЛА немедленно доступны в качестве инструмента для ученых и фермеров, занимающихся дистанционным зондированием [47]. В последние годы были доступны небольшие коммерческие БПЛА (<50 кг) [48] для экологических и сельскохозяйственных применений. Небольшим БПЛА принадлежат технологии дистанционного зондирования земель (ДЗЗ), всегда популярному набору инструментов для мониторинга окружающей среды. Гибкость во времени сбора данных и значительно меньшие затраты на извлечение изображений могут привести к тому, что небольшая индустрия БПЛА превысит спрос со стороны традиционных пилотируемых самолетов. Изображения, снятые с использованием БПЛА, обычно имеют пространственное разрешение в сантиметрах, и получение изображений управляемо и не зависит от облачного покрова. Таким образом, полученные БПЛА изображения могут быть практической альтернативой аэрофотоснимкам и спутниковым снимкам высокого разрешения. Несмотря на то, что в БПЛА не было много тематических исследований, в которых примеры применения БПЛА в исследованиях окружающей среды становятся все более очевидными в литературе. Такие исследования могут дать представление о том, насколько применимы эти инструменты для различных целей ТЗ.

Использование небольшого БПЛА процветало за последнее десятилетие, при этом различные платформы LARS использовались специально для мониторинга изменений окружающей среды. В настоящее время существует множество таких инструментов, доступных по разным ценам. Хотя относительно дешево, маневренность этих платформ делает его сложным для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур. Следовательно, самой популярной платформой для экологических исследований была небольшая БПЛА, которые также известны как дистанционно управляемые транспортные средства (ДУТС/RPV), летательные аппараты с дистанционным управлением (ЛАДУ/ ROA) и дистанционно управляемые вертолеты (RC-Helicopter) [49]. В последние годы было больше применений с использованием небольших беспилотных летательных аппаратов [12, 49-52] дроны и квадрокоптеры [14, 53, 54] (рисунок 1). Эти платформы включают собранные блоки из готовых частей [16] или полные коммерчески доступные [48, 49].

В дополнение к множеству доступных платформ существует множество типов датчиков дистанционного зондирования, которые могут использоваться для фактического сбора дан-

ных. Датчики для захвата изображений включают пленочные камеры [50, 55], готовые коммерческие (неметрические) цифровые камеры [13, 14, 49, 50, 56] и даже модифицированные цифровые камеры с вблизи инфракрасного диапазона [57]. Также были разработаны специфические БПЛА которые включают в себя мультиспектральную камеру ADC [16, 54] и картографическую камеру MCA [10, 58].

Рисунок 1 – Беспилотные летательные аппараты

На сегодняшний день полученные БПЛА изображения были успешно использованы для оценки степени использования кустарников [59], картирования видов трав [60], для картирования лесных пожаров [61], измерения кустарниковой биомассы [59, 60], для помощи в управлении виноградниками [54] и для картирования растительности пастбищных угодий [62]. Что касается сельского хозяйства, то они были использованы для обнаружения небольших пастбищных сорняков в пастбищных угодьях [63], документирования водного стресса в культурах [10] мониторинга биомассы культур [12, 47], сопоставления виноградников [54] и изучения результатов различных обработок азота на культурах [12, 2]. БПЛА также использовались для оценки ирригационных систем в полевом масштабе (рисунок 2).

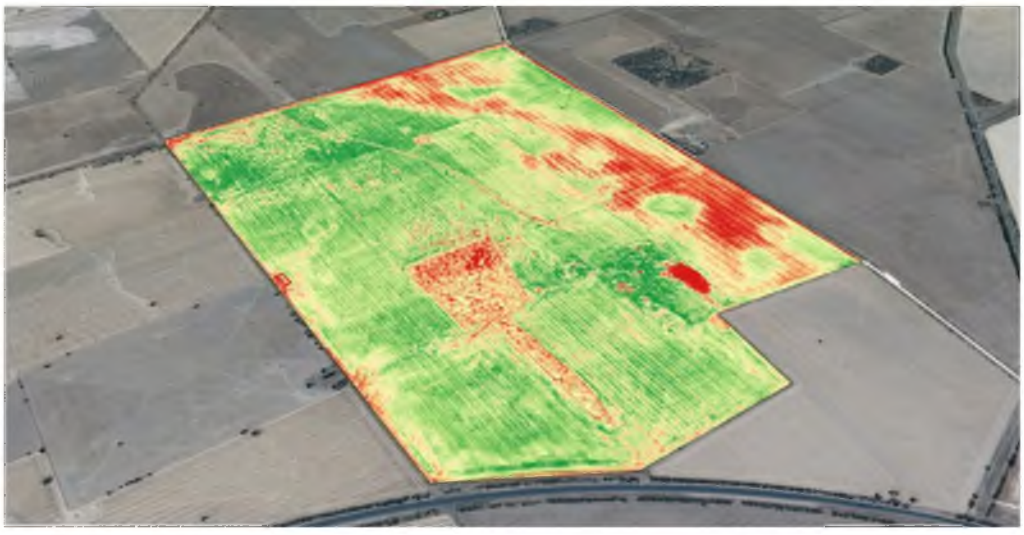

Рисунок 2 – Оценка состояние ирригационной системы

Типы культур, исследованные с использованием данных, собранных БПЛА, включают рис [2, 47], пшеницу [57] и кукурузу [12]. К сожалению, в отличие от дистанционного зондирования спутников было проведено минимальное количество исследований роста сельскохозяйственных культур на основе полученных изображений БПЛА [10, 12, 13, 57]. В этих исследованиях

изучались отношения индексов растительности, полученных от датчиков на основе БПЛА, со статусом азота кукурузы и биомассы сои [12], различными обработками азотом рис [2] и с пшеницей LAI [13].

*Потенциал применения БПЛА в сельском хозяйстве*

Хотя практика по ТЗ набирает популярность во всем мире [3, 4], использование методов дистанционного зондирования в сельском хозяйстве попрежнему ограничено. Согласно этому исследованию, системы GPS-навигации являются наиболее часто используемым методом ТЗ. Однако применение других методов, включая технологию картирования (ГИС и дистанционного зондирования) было показано, что оно значительно ниже. По данным Stafford [3], основным драйвером ТЗ является максимизация прибыли, и фермеры просто не уверены в экономических выгодах инвестирования в спутниковые снимки и другие пространственные продукты. Кроме того, необходимы навыки для пространственного анализа (т.е. создания карты на основе интегрированных источников данных), чего не хватает многим фермерам [45, 64]. Более того, неопределенность в отношении надежности карт урожайности для управления культурами еще больше снижает их воспринимаемую ценность [3], хотя некоторые испытания на ферме показали преимущества не менее 20 долл./га на основе методов управления зонами [4, 27, 29]. Несмотря на то, что имеется несколько исследований относительно прибыльности принятия ТЗ [65], мало говорится о экономических преимуществах дистанционного зондирования БПЛА для ТЗ [41]. Следовательно, Tenkorang и DeBoer [41] предложили, чтобы в этой области ТЗ проводились подробные анализы затрат и выгод с достаточным количеством повторений.

Знания фермера об изменениях в их областях также являются важным фактором, влияющим на восприятие и принятие технологий ТЗ [66]. Было обнаружено, что те люди, которые больше осведомлены о пространственном изменении свойств почвы арендованных земель, с большей вероятностью признают и применяют технологию ТЗ [67]. В дополнение к отсутствию информации для фермеров относительно использования БПЛА, в предыдущих исследованиях на базе БПЛА использовались экспериментальные поля для сельскохозяйственных культур и просто не привлекались к практикам ТЗ. Эти культивирования пахотных земель были специально разработаны для обеспечения идеальной культуры для экспериментов по дистанционному зондированию. Таким образом, в настоящее время не представляется правдоподобным оценить целесообразность использования полученных БПЛА изображений фермерами в более реалистичных условиях. К счастью, было показано, что использование модели участия на уровне сообщества было очень успешным с использованием спутниковых снимков Landsat высокого разрешения [27]. Для БПЛА это может указывать на то, что текущие исследования практически не оказывают прямого воздействия на потенциальное применение фермерами геопространственных методов в своей практике.

Таким образом, ясно, что применение БПЛА в ТЗ все еще находится в зачаточном состоянии и что есть значительные возможности для дальнейшего развития как в отношении технологии, так и в различных потенциальных приложениях. Улучшенное согласование между образцами БПЛА и данными об истине на местах, гибкость времени сбора и относительно низкая стоимость должны побуждать других

рассматривать эти устройства в качестве ключевых инструментов в будущих точных сельскохозяйственных усилиях. На данный момент успешное применение БПЛА для мониторинга условий пастбищных угодий [48, 68] демонстрирует, что использование БПЛА в ТЗ может стать следующим этапом успеха в приложениях дистанционного зондирования. Это могло бы консолидировать интеграцию БПЛА в ТЗ и тем самым способствовать совершенствованию технологий. Как и в настоящее время, будущие приложения могут быть приписаны совершенствованию дизайна БПЛА, снижению системных цен, улучшенным методам / процедурам обработки изображений, более слабым правилам для применения в окружающей среде и системам распространения практической информации для фермеров.

*Способы извлечения информации из изображений БПЛА*

Подобно спутниковым изображениям и аэрофотоснимкам изображения БПЛА могут применяться в зональном картографировании, используемом для количественной оценки биологических переменных и используемых для выявления аномалий в пахотных землях. Зональное отображение может быть ключевым компонентом ТЗ, поскольку необходима точная информация о пространственных изменениях почвы и посевов. Одним из наиболее распространенных методов зонального картирования почв является выборка грунта физических и химических свойств на основе сетки (ячейки или центра), которая затем может использоваться для пространственной интерполяции [3, 69]. Тем не менее, в некоторых странах, таких как Австралия, была разработана стратегия отбора проб почвы [70]. Long и др. [71] показано, что данные об урожайности с аэрофотоснимков оказались более точными, чем от традиционной геостатистической интерполяции и карт почвенного обследования. Зональные карты также могут быть основой на нескольких годах исторических данных урожайности, собранных с использованием мониторов выхода [69, 72]. Такие карты использовались в качестве входных данных для процедур применения удобрений и других методов [6]. Однако данные из мониторов выхода могут содержать много источников ошибок [46]. Невзирая на то, что отбор проб почвы является дорогостоящим и требует много времени [3], а зональные карты, основанные на урожайности, нуждаются в дополнительном вкладе в состояние текущего года. Следовательно, спутниковые снимки высокого разрешения были применены в качестве альтернативы для мониторинга состояния растительности и почвы. Например, недавно была создана зональная карта с использованием NDVI, основанной на IKONOS, и было показано, что она значительно дешевле, чем карты, созданные из образцов почвы на основе сетки [27]. Yang и др. соавторы [73] обнаружили, что между классификационными картами, полученными из карт дистанционного зондирования и производства, наблюдаются высокие корреляции. Следовательно, процедура создания зональной карты, основанная на изображениях БПЛА, может предоставить чрезвычайно важную информацию для фермеров.

Также можно было бы установить автоматическую процедуру идентификации цели, чтобы идентифицировать аномалии полей сельскохозяйственных культур (например, сорняки, болезни, стрессы засухи) в изображениях БПЛА. Кроме того, необходимо проверить извлечение различных биологических переменных (например, LAI, концентрация хлорофилла на куполе и выход) из изображений БПЛА. Способность точно оценивать концентрацию хлорофилла растений может предоставить производителям ценную информацию

для оценки урожайности сельскохозяйственных культур и принятия решений относительно управления N [47]. Захват изображений БПЛА в течение всего вегетационного периода для одного конкретного урожая также может помочь решить решающую дату получения изображений для многих биологических переменных.

*Привлечение интересов фермеров и проведение экономической эффективности анализа*

В целях расширения применения БПЛА в ТЗ ученые дистанционного зондирования могли более тесно сотрудничать с практиками ТЗ, демонстрируя, таким образом, способность БПЛА и их потенциальную прибыльность посредством анализа затрат и выгод. Многие фермеры стремятся применять современные технологии в своей практике [27], чтобы максимизировать прибыль, но, как указывалось ранее, затраты, доставка и извлечение информации, связанные с данными дистанционного зондирования, были препятствием их использования в сельскохозяйственной практике [3]. Однако Seelan и др. соавторы [27] показали, что использование учебного сообщества, объединяющего ученых-исследователей, фермеров и поставщиков данных, может сократить время, необходимое для рассеивания изображений. В своем исследовании сообщества Seelan и др. соавторы [27] использовали Landsat, изображения IKONOS с высоким разрешением и аэрофотоснимки.

Изображения с высоким разрешением использовались для визуальной интерпретации, классификации и валидации, и исследование основывалось на большой пространственной шкале. Используя доступный БПЛА, экономическая эффективность при реализации интегрированной программы дистанционного зондирования подобного типа может быть значительно улучшена. Например, Beeri и Peled [74] показали, что приложения, использующие захваченные изображения БПЛА, могут сократить временные рамки, необходимые для корректировки сельскохозяйственной практики, и что результаты мониторинга дистанционного зондирования были лучше, чем результаты традиционных методов контроля. Более того, демонстрация таких приложений имеет важное значение для убеждения фермеров в преимуществах использования геопространственных технологий на своих фермах. Кроме того, примеры экономических и экологических преимуществ также имеют решающее значение, если большее число конечных пользователей должно быть убеждено в их важности. В таких случаях ценность технологии оправдана, поскольку полученная информация позволяет принять решение, которое приведет к повышению прибыльности и более ответственному управлению. Для этого необходимо провести анализ затрат и выгод, чтобы убедить фермеров принять БПЛА или запросить обслуживание у консультационных организаций, которые предоставляют изображения БПЛА.

Если фермеры должны быть интегрированы в этапы интерпретации и обработки изображений, может возникнуть необходимость в создании веб-ГИС для совместного использования изображений, ввода информации и обработки. Фермерам не хватало необходимых навыков для извлечения достоверной информации из изображений БПЛА, но ученые дистанционного зондирования могут быть незнакомы с полевыми и культурными условиями. Поэтому подход, который объединяет навыки как ученых, так и фермеров с дистанционным зондированием, может быть использован для определения наиболее подходящих средств для использования новой технологии ТЗ при одновременном содействии устойчивому развитию. Ученые, занимающиеся

дистанционным зондированием, могли собирать изображения с использованием датчиков на борту БПЛА и тесно сотрудничать с фермерами для мониторинга роста посевов. Отклики от фермеров будут необходимы для определения наиболее оптимального использования этой новой технологии. Самое главное, что это сотрудничество может значительно сократить время, необходимое для извлечения информации из изображений, следовательно, для фермеров, чтобы скорректировать свою сельскохозяйственную практику.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последнее годы все большее число примеров применения БПЛА в мониторинге окружающей среды и ТЗ. Приложения дистанционного зондирования БПЛА в ТЗ включают, но не ограничиваются ими, картографирование урожайности, измерение химического состава, картографирование энергии, мониторинг стресса растительности и оценку воздействия удобрения на рост сельскохозяйственных культур. Однако по-прежнему существует множество существенных недостатков, связанных с дистанционным зондированием БПЛА, включая высокие начальные затраты, надежность платформы, возможности датчиков и отсутствие стандартизованной процедуры обработки больших объемов данных. Более того, строгие авиационные правила и простое отсутствие интереса со стороны фермеров могут помешать принятию БПЛА. К счастью, ожидается, что с развитием технологии платформ БПЛА, новыми камеры, меньшими затратами, улучшенными технологиями обработки изображений и большим количеством экспериментальных исследований дистанционного зондирования на базе БПЛА для применения в сельском хозяйстве будет более выгодным использование преимуществ этих систем в ТЗ и мониторинге окружающей среды. Кроме того, предлагается, чтобы, если бы авиационные правила БПЛА могли быть смягчены, а ученые-исследователи более активно взаимодействовали с фермерским сообществом, может произойти более широкое внедрение БПЛА в ТЗ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1Sidorova V.A., Zhukovskii E.E., Lekomtsev P.V., Yakushev V.V. Geostatistical analysis of the soil and crop parameters in a field experiment on precision agriculture // Eurasian Soil Science. – 2012. – 8 (45). – Pp. 783-792.

2Swain K.C., Jayasuriya H.P., Salokhe V.M. Suitability of low-altitude remote sensing images for estimating nitrogen treatment variations in rice cropping for precision agriculture adoption [Electronic resource] // Journal of Applied Remote Sensing. – 2007. – №1. – Mode of access: https://doi.org/10.1117/1.2824287.

3Stafford J.V. Implementing precision agriculture in the 21st century // Journal of Agricultural Engineering Research. – 2000. – Vol. 76. – Pp. 267-275.

4Robertson M., Carberry P., Brennan L. The economic benefits of precision agriculture: cast studies from Australia grain farms / Controlled Traffic and Precision Agriculture Conference. - 2007. - Pp. 181-187.

5McBratney A., Whelan B., Ancev T. Future directions of precision agriculture// Precision Agriculture. – 2005. – Vol. 6. – Pp. 7-23.

6Moran M.S., Inoue Y., Barnes E.M. Opportunities and limitation for image-based remote sensing in precision crop Management // Remote Sensing of Environment. - 1997. – Vol. 61. – Pp. 319-346.

7Cook S.E., Bramley R.G. Precision agriculture: Opportunities, benefits and pitfalls of site specific crop management in Australia // Australian Journal of Experimental Agriculture. – 1998. – Vol. 38. – P. 753-763.

8Warren G., Metternicht G. Agricultural applications of high-resolution digital multispectral imagery: Evaluating within-field spatial variability of canola (Brassica napus) in Western Australia // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. -2005. – Vol. 71. – Pp. 595-602.

9Zhang J.H., Wang K., Bailey J.S., Wang R.C. Predicting nitrogen status of rice using multispectral data at canopy scale // Pedosphere. – 2006. – Vol. 16. – Pp. 108-117.

10Berni J.A., Zarco-Tejada P.J., Suarez L., Fereres E. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47. – Pp. 722-738.

11Rango A., Laliberte A.S., Herrick J.E., Winters C., Havstad K., Steele C. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management [Electronic resource] // Journal of Applied Remote Sensing. – 2009. – Vol. 3. - Mode of access: https://doi.org/10.1117/1.3216822

12Hunt E.R., Cavigelli M., Daughtry C.S., McMurtrey J.E., Walthall C.L. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status // Precision Agriculture. – 2005. – Vol. 6. – Pp. 359-378.

13Lelong C.D., Burger P., Jubelin G., Roux B., Labbe S., Barett F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots // Sensors. – 2008. – Vol. 8. – Pp. 3557-3585.

14Nebiker S., Annen A., Scherrer M., Oesch D. A light-weight multispectral sensor for micro UAV: Opportunities for very high resolution airborne remote sensing//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. - Vol. XXXVII. Part B1. - Pp. 1193-1200.

15Hardin P.J., Hardin T.J. Small-scale remotely piloted vehicles in environmental research // Geography Compass. – 2010. – Vol. 4. – Pp. 1297-1311.

16Xiang H., Tian L. Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform // Biosystems Engineering. – 2011. – Vol. 108. – Pp. 104-113.

17Colewell R.N. Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography // Hilgardia. – 1956. – Vol. 26. – Pp. 223-286.

18Monmonier M. Aerial photography at the Agricultural Adjustment Administration: Acreage controls, conservation // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2002. – Vol. 68. – Pp. 1257-1261.

19Malthus T.J., Maderia A.C. High resolution spectroradiometry: Spectral reflectance of field bean leaves infected by Botrytis fabae // Remote Sensing of Environment. – 1993. – Vol. 45. – Pp. 107-116.

20De Tar W.R., Chesson J.H., Penner J.V., Ojala J.C. Detection of soil properties with airborne hyperspectral measurements of bare fields // Transactions of the ASABE. – 2008. – Vol. 51. –Pp. 463-470.

21Gomez C., Rossel R.V., McBratney A.B. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study// Geoderma. -2008. – Vol. 146. – Pp. 403-411.

22Rao N.R., Garg P.K., Ghosh S.K., Dadhwal V.K. Estimation of leaf total chlorophyll and nitrogen concentrations using hyperspectral satellite imagery // Journal of Agricultural Science. – 2008. – Vol. 146. – Pp. 65-75.

23Lan Y., Huang Y., Martin D.E., Hoffmann W.C. Development of an airborne remote sensing system for crop pest management: System integration and verification // American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2009. – Vol. 25. – P. 607-615.

24Erickson B.J., Johannsen C.J., Vorst J.J., Biehl L.L. Using remote sensing to assess stand loss and defoliation in maize // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2004. – Vol. 70. – Pp. 717-722.

25Wu J.D., Wang D., Bauer M.E. Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies // Field Crops Research. – 2007. – Vol. 102. – Pp. 33-42.

26Gutierrez P.A., Lopez-Granados F., Jurado-Exposito J.M., Hervas-Martinez C. Logistic regression product-unit neural networks for mapping Ridolfia segetum infestations in sunflower crop using multitemporal remote sensed data // Computers and Electronics in Agriculture. – 2008. – Vol. 64. – Pp. 293-306.

27Seelan S.K., Laguette S., Casady G.M., Seielstad G.A. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach // Remote Sensing of Environment. -2003. – Vol. 88. – Pp. 157-169.

28Zhao D.H., Huang L.M., Li J.L., Qi J.G. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy// ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2007. – Vol. 62. – Pp. 25-33.

29Godwin R.J., Richards T.E., Wood G.A., Welsh J.P., Knight S.M. An economic analysis of the potential for precision farming in UK cereal production//Biosystems Engineering. – 2003. – Vol. 84. – Pp. 533-545.

30Du Q., Chang N.B., Yang C.H., Srilakshmi K.R. Combination of multispectral remote sensing, variable rate technology and environmental modeling for citrus pest management// Journal of Environmental Management. – 2008. – Vol. 86. – Pp. 14-26.

31Gomez-Casero M.T., Castillejo-Gonzalez I.L., Garcia-Ferrer A., Pena-Barragan J.M., Jurado-Exposito M., Garcia-Torres L. Spectral discrimination of wild oat and canary grass in wheat fields for less herbicide application // Agronomy for Sustainable Development. – 2010. – Vol. 30. – Pp. 689-699.

32McNairn H., Brisco B. The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: A review // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2004. – Vol. 30. – Pp. 525-542.

33Sullivan D.G., Shaw J.N., Rickman D. IKONOS imagery to estimate surface soil property variability in two Alabama physiographies//Soil Science Society of America Journal. -2005. – Vol. 69. – Pp. 1789-1798.

34Zarco-Tejada P.J., Gonzalez-Dugo V., Berni J.A. Fluorescence, temperature and narrow¬band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 117. –Pp. 322-337.

35Laliberte A.S., Rango A., Fredrickson E.L. Multi-scale, object-oriented analysis of QuickBird imagery for determining percent cover in arid land vegetation. In: 20th Biennial Workshop on Aerial Photography, Videography, and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment [Electronic resource]. – Weslaco, TX, 2012. – Mode of access: https://jornada.nmsu.edu/bibliography/05-055Proc.pdf.

36Beeri O., Phillips R., Carson P., Liebig M. Alternate satellite models for estimation of sugar beet residue nitrogen credit // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2005. – Vol. 107. – Pp. 21-35.

37Bausch W.C., Khosla R. QuickBird satellite versus ground-based multi-spectral data for estimating nitrogen status of irrigated maize // Precision Agriculture. – 2010. – Vol. 11. – Pp. 274-290.

38Donoghue D., Watt P., Cox N., Wilson J. Remote sensing ofspecies mixtures in coniferplantations using LiDAR height and intensity data. International Workshop 3D

remote sensing in Forestry [Electronic resource]. – 2012. – Mode of access: http://www.rali.boku.ac.at/fileadmin/_/H857-VFL/workshops/3drsforestry/presentations/6a.5-donoghue.pdf.

39Castillejo-Gonzalez I.L., Lopez-Granados F., Garcia-Ferrer A., Pena-Barragan J.M., Jurado-Exposito M., Orden M.S. Object- and pixel-based analysis for mapping crops and their agro- environmental associated measures using QuickBird imagery // Computers and Electronics in Agriculture. – 2009. – Vol. 68. – Pp. 207-215.

40Haboudane D., Miller J.R., Pattey E., Zarco-Tejada P.J., Strachan I.B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture // Remote Sensing of Environment. – 2004. – Vol. 90. – Pp. 337-352.

41Tenkorang F., DeBoer L. On-farm profitability of remote sensing in agriculture// Journal of Terrestrial Observation. – 2007. – Vol. 1. – Pp. 50-59.

42Whipker L.D., Akridge J.T. Precision agricultural services dealership survey results [Electronic resource]. – 2012. – Mode of access: http://www.agecon.purdue.edu/cab/research_articles/articles/2009_crop_life_precision_report.pdf.

43Robert P.C. Use of remote sensing imagery for precision farming/In: Proceedings of 26th International Symposium on Remote Sensing of Environment and 18th symposium of the Canadian Remote Sensing Society, Ontario, Canada. – 1996. – Pp. 596-599.

44Murakami E., Saraiva A.M., Ribeiro L.C., Cugnasca C.E., Hirakawa A.R., Correa P. L. An infrastructure for the development of distributed service-oriented information systems for precision agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. – 2007. – Vol. 58. – Pp. 37-48.

45Griffin T.W., Lowenberg-Deboer J., Lambert D.M., Peone J., Payne T., Daberkow S. G. Adoption, profitability, and making better use of precision farming data [Electronic resource] / Staff paper.– West Lafayette, IN, USA: Department of Agricultural Economics, Purdue University, 2004. – No. 04-06. – Mode of access: http://ageconsearch.umn.edu/record/28615.

46Lamb D.W., Frazier P., Adams P. Improving pathways to adoption: Putting the right P's in precision agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. – 2008. – Vol. 61. – Pp. 4-9.

47Swain K.C., Thomson S.J., Jayasuriya H.P. Adoption of an unmanned helicopter for low- altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop// American Society of Agricultural and Biological Engineers. -2010. – Vol. 53. – Pp. 21-27.

48Laliberte A.S., Rango A. Image processing and classification procedures for analysis of sub¬decimeter imagery acquired with an unmanned aircraft over arid rangelands // GIScience & Remote Sensing. – 2011. – Vol. 48. – Pp. 4-23.

49Eisenbeiss H. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system over and image acquisition. In: A. Gruen, Sh. Murai, T. Fuse,F. Remondino (Eds.) [Electronic resource] / Proceedings of International Workshop on Processing and Visualization Using High-Resolution Imagery, XXXVI(5/W1), Pitsanulok, Thailand. – 2012. – Mode of access: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W1/papers/11.pdf.

50Hunt E.R., Daughtry C.S., Walthall C.L., McMurtrey J.E., Dulaney W.P. Agricultural remote sensing using radio-controlled aircraft. In: T. VanToai, D. Major, M. McDonald, J. Schepers & L. Tarpley (Eds.). Digital image and spectral techniques: Applications to precision agriculture and crop physiology // American Society of Agronomy. – 2003. – Vol. 66. - Pp. 197-205.

51Johnson L.F., Herwitz S.R., Lobitz B.M., Dunagan S.E. Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery // Applied Engineering in Agriculture. -2004. – Vol. 20. – Pp. 845-849.

52Laliberte A.S., Herrick J.E., Rango A. Acquisition, orthorectification, and object-based classification of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for rangeland monitoring // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2010. – Vol. 76. – Pp. 661-672.

53Kendoul F., Lara D., Fantoni-Coichot I., Lozano R. Real-time nonlinear embedded control for an autonomous quadrotor helicopter // Journal of Guidance Control and Dynamics. -2007. – Vol. 30. – Pp. 1049-1061.

54Primicerio J., Gennaro S.D., Fiorillo E., Genesio L., Lugato E., Matese A., et al. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture // Precision Agriculture. – 2012. – Vol. 13. –Pp. 517-523.

55Aber J.S., Marzolff I., Ries J.B. Small-format aerial photography // Boston: Elsevier, 2010. – 266 p.

56Lewis G. Evaluating the use of a low-cost unmanned aerial vehicle platform in acquiring digital imagery for emergency response. In J. Li, S. Zlatanova, & A. Fabbri (Eds.), Geomatics solutions for disaster management. – Berlin: Springer, 2007. - Pp. 117-133.

57Hunt E.R., Hively W.D., Fujikawa S.J., Linden D.S., Daughtry C.S.T., McCarty G. W. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring // Remote Sensing. – 2010. – Vol. 2. – Pp. 290-305.

58Gomez-Candon D., Lopez-Granados F., Caballero-Novella J.J., Gomez-Casero M.T., Jurado-Exposito M., Garcia-Torres L. Geo-referencing remote images for precision agriculture using arti¬ficial terrestrial targets // Precision Agriculture. – 2011. – Vol. 12. – Pp. 876-891.

59Quilter M.C., Anderson V.J. A proposed method for determining shrub utilization using (LA/ LS) imagery // Journal of Range Management. – 2001. – Vol. 54. – Pp. 378-381.

60Hardin P., Jackson M. An unmanned aerial vehicle for rangeland photography // Rangeland Ecology & Management. – 2005. – Vol. 58. – Pp. 439-442.

61Hinkleya E.A., Zajkowski T. USDA forest service-NASA: Unmanned aerial systems demon- strations-pushing the leading edge in fire mapping // Geocarto International. – 2011.– Vol. 26. – Pp. 103-111.

62Laliberte A.S., Rango A. Texture and scale in object-based analysis of subdecimeter resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Special Issue on UAV Sensing Systems in Earth Observation. – 2009. – Vol. 47. – Pp. 761-770.

63Hardin P.J., Jackson M.W., Anderson V.J., Johnson R. Detecting squarrose knapweed (Centaurea virgata Lam. Ssp. Squarrosa Gugl.) using a remotely piloted vehicle: A Utah case study // GIScience & Remote Sensing. – 2007. – Vol. 44. – Pp. 203-219.

64Fisher P.D., Abuzar M., Rab M.A., Best F., Chandra S. Advances in precision agriculture in south-eastern Australia. I. A regression methodology to simulate spatial variation in cereal yields using farmers' historical paddock yields and normalised difference vegetation index // Crop & Pasture Science. – 2009 .– Vol. 60. – Pp. 844-858.

65Silva C.B., Vale S.R., Pinto F.C., Muller C.S., Moura A.D. The economic feasibility of precision agriculture in Mato Grosso do Sul State, Brazil: A case study // Precision Agriculture. – 2007. – Vol. 8. – Pp. 255-265.

66Adrian A.M., Norwood S.H., Mask P.L. Producers' perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies // Computer and Electronics in Agriculture. – 2005. – Vol. 48. – Pp. 256-271.

67Torbett J.C., Roberts R.K., Larson J.A., English B.C. Perceived improvements in nitrogen fertilizer efficiency from cotton precision farming // Computers and Electronics in Agriculture. – 2008. – Vol. 64. – Pp. 140-148.

68Rango A., Laliberte A.S. Impact of flight regulations on effective use of unmanned aerial vehicles for natural resources applications [Electronic resource] // Journal of Applied Remote Sensing. – 2010. – Vol. 4. – Mode of access: https:// doi.org/10.1117/1.3474649.

69Flowers M., Weisz R., White J.G. Yield-based management zones and grid sampling strategies: Describing soil test and nutrient variability // Agronomy Journal. – 2005. – Vol. 97. –P p. 968-982.

70McBratney A.B., Whelan B.M., Shatar T. Variability and uncertainty in spatial, temporal and spatio-temporal crop yield and related data // In: Precision agriculture: Spatial and temporal variability of environmental quality. Chichester: Wiley. – 1997. - Pp. 141-160.

71Long D.S., Carlson G.R., DeGloria S.D. Quality of field management maps. In P. C. Robert (Ed.), Proceedings of Site-Specific Management for Agriculture Systems Madison: American Society of Agronomy. - 1995. - Pp. 251-271.

72Diker K., Heermann D.F., Bordahl M.K. Frequency analysis of yield for delineating yield response zones // Precision Agriculture. – 2004. – Vol. 5. – Pp. 435-444.

73Yang C., Bradford J.M., Wiegand C.L. Airborne multispectral imagery for mapping variable growing conditions and yields of cotton, grain sorghum, and corn. American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2001. – Vol. 44. – Pp. 1983-1994.

74Beeri O., Peled A. Geographical model for precise agriculture monitoring with real-time remote sensing // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 64. – Pp. 47-54.

## ТҮЙІН

Б.У Сулейменов[1], С.И. Танирбергенов[1]

### ПИЛОТСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫН НАҚТЫ ЕГІНШІЛІК ШАРУАШЫЛЫҒЫНДА ҚОЛДАНУДЫҢ КЕЛЕШЕГІ: ШОЛУ

*[1]Ө.О.Оспанов атындағы Қазақ топырақтану және агрохимия ғылыми-зерттеу институты, 050060, Алматы, ал-Фараби д. 75 Б, Қазақстан, e-mail: beibuts@mail.ru*

Нақты егіншілік - бұл геоақпараттық жүйелерді пайдаланумен байланысты агросфераның дамуындағы жаңа кезең. Қазіргі уақытта ауылшаруашылығын зерттеу үшін жоғары дәлдікті спутниктік бейнелер кеңінен қолданылады, бұл нақты ауыл шаруашылығының міндеттерін жүзеге асыруда Қазақстан үшін инновация болып табылады. Алайда, жоғары дәлдікті бейнелерді алу шығынды артырады, сондай-ақ бейнелерді алуға жиі тыйым салынуына байланысты фермерлік шаруашылықтарға нақты қолдану үшін балама өнімді ұсынады. Атап айтқанда, пилотсыз ұшу аппараттары (ПҰА) төменгі биіктікте қашықтықтан басқару арқылы платформаларымен жасалған суреттерді қоршаған ортаны бақылауға, жоғары кеңістіктік және уақытша ажыратымдылыққа және оларды суретке түсіруде, бағдарламалауда жоғары икемділікке байланысты операциялардың төмен құны ескеріле отырып әлеуетті балама болып табылады. Әлемде нақты егіншілік үшін ПҰА-ң суреттерін қолдану бойынша бірнеше зерттеулер жүргізілді. Осы зерттеулердің нәтижелері фермерлер үшін сенімді өнімнің

түпкілікті өнімін қамтамасыз ету үшін платформаны жетілдіруде, өндірісте, стандарттауда, сондай-ақ ақпаратты өңдеу процесінде қажет.

*Түйінді сөздер:* нақты егіншілік, пилотсыз ұшу аппараттары, ГАЖ технологиясы.

SUMMARY

B.U. Suleymenov[1], S.I. Tanirbergenov[1]

PERSPECTIVES OF APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLE IN THE PRECISION FARMING: REVIEW

*[1]U.U.Uspanov Kazakh research institute of soil science and agrochemistry, 050060, Almaty, ave. al-Faraby 75B, Kazakhstan,*
*e-mail: beibuts@mail.ru*

Precision farming is a new stage in the development of the agrosphere, connected with the use of geoinformation systems. At present, satellite images with high resolution are more widely used for study in agriculture, which is an innovation for Kazakhstan in the implementation of the tasks of precision farming. However, the presence and often-prohibitive costs of such images suggest an alternative product for this particular application in precision farming. In particular, images made by remote sensing platforms with low altitude of unmanned aerial vehicle (UAV) are a potential alternative, given their low cost of operation in monitoring the environment, high spatial and temporal resolution, and their high flexibility in image capture, programming. In the world, several studies have been carried out on the application of UAV images for precision farming. The results of these studies indicate that in order to provide a reliable end product for farmers, success in platform development, production, standardization of image georeference, and also in the process of information processing is necessary.

*Key words:* precision farming, unmanned aerial systems, GIS technology.