

УДК 004.9

М.Ю. Катаев, М.О. Крылов, П.П. Гейко

Программа сравнения изображений вегетационного индекса по данным, полученным со спутников и беспилотного летательного аппарата

В настоящее время практика поддержки многих видов деятельности человека требует применения инфраструктуры пространственно-временных данных (Spatial data infrastructure). Такая инфраструктура интегрирует внутри себя пространственно-временные наборы из многих источников информации, предоставляя пользователю различного вида методы обработки, анализа и визуализации. В данной статье описываются архитектура программной системы и процессы управления наборами пространственно-временных данных для решения задач сельского хозяйства. В качестве входной информации берутся данные измерений с помощью многоспектральных спутниковых систем, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также априорная информация (метеорология, агрохимическая информация и др.). Пользователем программной системы предоставляется возможность контроля пространственной информации территории сельскохозяйственных полей, наборов временных данных от разнородных пространственных данных. Важным результатом работы является совмещение результатов спутниковых и БПЛА изображений по контролируемым параметрам, что позволяет расширить область использования БПЛА и верифицировать их. Приведены результаты обработки реальных данных.

Ключевые слова: спутниковые приборы дистанционного зондирования, беспилотные летательные аппараты, изображения, вегетационные индексы, структура программы.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-4-63-70

Актуальность выбранной темы исследования связана с тем, что в настоящее время наблюдается обострение проблемы перехода от старой системы управления и ведения хозяйства к цифровой экономике [1–3]. Наступающая новая эра цифровой трансформации практически всех сфер человеческой деятельности требует разработки и внедрения решений по переходу на новую форму хозяйствования. Одной из отраслей, в которой ведется переход на цифровую форму, является сельское хозяйство [4, 5]. Сложность новой формы работы связана с переходом от интуитивных, полученных на опыте решений к использованию результатов анализа больших массивов данных, возникающих в применяемых цифровых технологиях. Это требует пересмотра или изменения отработанных временем методик, принципов сложившихся практик.

Одной из важных существующих проблем, препятствующих внедрению цифровых технологий в виде программно-аппаратных решений, в ходе которых генерируются пространственно-временные данные, является удаленность от центров их обработки и хранения. В настоящее время инфраструктура таких центров локализована более в городах. Это обстоятельство требует разработки интернет-ресурсов, способных удовлетворять потребности сельскохозяйственных работников в получении и использовании результатов обработки пространственно-временной информации. Заметим, что существующие программно-аппаратные решения, используемые для предоставления информации для сельского хозяйства, не в полной мере отвечают современным требованиям, которые предъявляются к функционированию интернет-ресурсов.

Несмотря на то, что системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) развиты достаточно хо-

рошо, отсутствует процесс сбора, хранения, обработки и анализа для целевого использования в сельском хозяйстве. Нет постоянной основы (включая финансирование) и регулярности в обеспечении заинтересованных потребителей актуальными данными ДЗЗ из космоса.

Известные программные продукты [6] предоставляют возможности для использования спутниковой информации на практике, но они связаны с решением узких задач и требуют наличия опытного специалиста, способного интерпретировать получаемые результаты. Отметим, что невозможно сделать одну программу обработки, например спутниковых данных или БПЛА, которая может быть использована всеми и во всех направлениях народного хозяйства. Разработка систем, напрямую связанных с специалистами-практиками, по определенному виду хозяйствования, например сельскому хозяйству, является важной задачей. Другой проблемой, которая требует решения, – это необходимость качества получаемой информации по объему, параметрам и их точности, которая требует сравнительного анализа с известной информацией, получившей достаточное доверие.

Постановка задачи

Изображения, полученные с помощью цифровых камер, установленных на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), все больше находят применение в научных исследованиях и практических целях. На практике наибольшее применение БПЛА находят в сельском хозяйстве как инструмент мониторинга растительности и лесных массивов, окаймляющих поля. Несмотря на увеличение присутствия БПЛА в различных практических задачах, отсутствуют стандартизированные протоколы передачи данных потребителям информации и нет соот-

ветствующего программного обеспечения. Имеющиеся программные продукты, например, фирмы Agisoft [7], Панорама [8], UASMaster фирмы Совзонд [9] и некоторые другие, решают больше задачи сбора информации, географической привязки, построения панорам, но не решения всех необходимых задач потребителя. В данной работе нами показываются варианты сбора и анализа RGB-изображений БПЛА и многоспектральных данных, полученных с помощью спутниковых платформ (рис. 1).



Рис. 1. Исследование поверхности земли методами совмещения изображений БПЛА и спутников

Разработанная авторами концепция совместного анализа данных измерений одной и той же территории спутниковыми, БПЛА и наземными приборами основана на предшествующем опыте авторов в области дистанционного зондирования [10, 11].

БПЛА являются важным дополнением к техническому обеспечению задач точного земледелия, так как способны отображать точно поверхность земли с высокой географической точностью. Использование изображений БПЛА в качестве источника информации о поверхности земли не всегда оправдано, так как требует их большого числа для облета всей исследуемой территории. Поэтому необходимо привлекать спутниковые данные, которые позволяют единым образом зафиксировать большую площадь, которая должна быть исследована. Однако в этом случае получаемые данные БПЛА и со спутников должны быть согласованы по пространству (географическая сетка) и извлекаемой информации (например, температура поверхности или вегетационные индексы).

Классификация растительного покрова в больших масштабах более всего возможна на основе данных спутников. Для этих целей разработано множество методов, например, К-средних, дерева решений, метод опорных векторов, нейронных сетей, объектного анализа (ОВИА) [11, 12], пространственно-временных изменений вегетационного индекса NDVI и др. Большинство указанных методов классификации позволяют с высокой точностью выделять различные классы типов поверхности, такие как растительность, вода, город, пашня т.п. Однако классификация выполняется только там, где наблю-

даются достаточно однородные по типу поверхности участки территории, а в случае смешанных типов точность классификации существенно падает. Особенно это значимо проявляется при изучении состояния растений на сельскохозяйственных полях, ввиду длительного (5–16 дней) и нерегулярного временного разрешения, а также незначительных по пространству очагов заражения сорняками, болезнями и т.д.

Надо отметить, что задача классификации типов поверхности в задачах точного сельского хозяйства является сложной и трудоемкой. Полностью эта задача решается на объединении данных разнотипных наземных измерений, БПЛА и спутников. Одним из возможных вариантов является объединение информации спутниковых данных с изображениями БПЛА. Ранее было сказано, что спутниковые многоспектральные изображения позволяют получить информацию сразу для большой территории, а БПЛА – лишь только на некоторой территории. Кроме того, спутниковые данные являются нерегулярными и с длительными интервалами между измерениями (в виду облачности), а БПЛА позволяют получать регулярную информацию (кроме времени дождя). Однако использование БПЛА должно быть таким, чтобы его многократное применение было экономически эффективным решением.

Многоспектральные изображения широко используются в спутниковом дистанционном зондировании для мониторинга состояния растительности. Для этого применяются спектральные каналы (отдельные изображения) в видимом спектре и ближней инфракрасной области спектра. С помощью БПЛА измерения проводятся чаще всего в видимой области (RGB-спектральные каналы), так как многоканальные устройства являются достаточно дорогими и требуют наличия специалиста для использования.

Для извлечения данных о состоянии растительности по многоспектральным изображениям БПЛА (включая и RGB) цифровых камер применяется информация об отражательной способности типов поверхности. Для этой цели выбираются два или более определенных спектральных канала, которые служат основой для расчета вегетационного индекса. Для спутников это нормированный вегетационный индекс NDVI, а для БПЛА его аналог Greenness. Изучая на изображении области с различными значениями этих индексов, появляется возможность проводить классификацию покрытия поверхности земли разными типами. Отражательная способность разных типов поверхности, таких как земля, вода, разреженная или густая растительность, является разной для выбранных спектральных каналов. Анализируя изображения БПЛА, появляется возможность выявлять различные показатели состояния растений: структуру листьев, содержание хлорофилла, площадь листьев, заболевания и др. Таким образом, объединяя результаты спутниковых приборов и БПЛА, появляется возможность получать информацию о состоянии растений.

Сбор и обработка данных

Вопросы точного применения методов обработки и получения выходных данных, необходимых для использования в практических задачах, пока являются открытой темой. В настоящий момент в исследования нет стандартизированного процесса обработки и анализа результатов измерений БПЛА, который помог бы пользователям избежать распространенных ошибок, которые влияют на качество получаемых данных. Нами предлагается найти пространственную взаимосвязь между детальными многоспектральными спутниковыми данными и RGB-изображениями БПЛА. Рассмотрение масштаба данной взаимосвязи имеет решающее значение для количественного определения и интерпретации результатов измерений БПЛА, что определит требования при планировании исследований при получении пространственно-временных данных. Для решения данной задачи необходимо построение такой программной системы, которая будет оперировать большими объемами данных измерений БПЛА, спутников, а также априорной информацией (рельеф, метеорологические данные и т.д.).

Данные о погодных условиях и солнечной активности являются дополнительными факторами, которые влияют на полученные спутником и БПЛА измерения в различных участках спектра. Большинство БПЛА не могут проводить измерения при сильном ветре и дожде. Однако облачное покрытие и угловое положение солнца существенно влияют на спектральный состав измеряемого излучения. Кроме того, наличие разорванной облачности приводит к появлению изменений объектов на изображении, когда кроме поверхности и облачности возникают тени, что искажает спектральную структуру измерений. Также заметим, что изменение солнечного угла может привести к изменению величины излучения даже в течение одного дня и периода полета (несколько дней).

В области задач точного земледелия возникает необходимость эффективного управления разнотипными данными, например, для получения оценки размеров областей всхожести, ареалов распространения сорняков, листовой массы, влажности, температуры почвы и т.д. Основой для решения этих задач являются спектральные индексы, среди которых самым распространенным является нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI). Спутниковые мультиспектральные изображения, благодаря оптическим характеристикам спектральных приборов, покрывают значительные территории в соответствии с некоторым временным разрешением 1,5 или 16 дней. Спутниковые приборы MODIS [13], Landsat-8 [14] и Sentinel-2 [15] являются популярными у ученых и практиков, так как предоставляют бесплатные и качественные наборы данных. Минимальное пространственное разрешение спутниковых спектральных каналов для MODIS составляет 250 м, для Landsat-8 – 30 м и Sentinel-2 – 10 м. Полученные по этим программам спутниковые

изображения применимы для решения многих сельскохозяйственных задач (посевная, созревание, уборка и т.д.).

При проведении мониторинга за состоянием растений на сельскохозяйственном поле важным фактором являются периодичность получения изображений и пространственное разрешение. Спутниковый прибор MODIS Terra позволяет получать изображения несколько раз в сутки при пространственном разрешении от 250 м (видимая и ближняя ИК-область спектра) до 1 км (ИК-область спектра). Такое пространственное разрешение позволяет проводить лишь качественное обследование больших пространств, так как один пиксель составляет площадь 5 га. Измерения, проводимые спутниковыми приборами Landsat-8 и Sentinel-2, имеют более высокое пространственное разрешение и позволяют более детально оценивать ситуацию на поле, но имеют меньшее временное разрешение (16 и 5 дней). Учитывая высокую вероятность покрытия территории сплошной или разорванной облачностью, для этих спутниковых приборов пропадает фактор регулярности измерений. Для получения регулярности измерений состояния растений возможно использовать сочетание данных спутниковых приборов и беспилотных летательных аппаратов. Однако при этом необходимо быть уверенным, что результаты обработки данных спутникового прибора и БПЛА коррелируют между собой.

Проблема сходимости данных спутникового прибора Landsat-8 и БПЛА частично рассмотрена в литературе на уровне сравнения вегетационных индексов [6, 16, 17]. Вегетационный индекс NDVI, рассчитанный по спутниковым измерениям, достоверно отражает состояние сельскохозяйственной растительности, о чем говорят множественные исследования [5]. Похожие по качеству измерения проводятся с борта БПЛА многоспектральными приборами (учитывается канал в ближней ИК-области спектра). Однако в большей своей части измерения проводятся с помощью RGB-цифровых камер, по результатам которых восстанавливается аналог вегетационного индекса Greenness. Поэтому, найдя сходимость вегетационного индекса NDVI, полученного по данным спутникового прибора Landsat-8, и Greenness, полученного по данным БПЛА, появляется возможность сделать мониторинг СХ полей регулярным. Кроме того, измерения БПЛА позволяют увеличить пространственное разрешение спутниковых данных для некоторых областей, в которых наблюдается неясная ситуация. Учитывая этот факт, целью проводимого в работе исследования является построение информационной системы, позволяющей совместно анализировать измерения спутниковых и БПЛА приборов.

Измерения с помощью БПЛА

Быстрый рост технологических возможностей БПЛА подтолкнул к разработке инновационных методологий практического применения в строительных, экологических и сельскохозяйственных целях.

Наибольшее количество исследований с использованием БПЛА было проведено для оценки потенциала RGB- и мультиспектральных изображений для поддержки задач точного земледелия [18–20]. Важнейшими задачами в этом направлении являются поиск сорняков на полях, мониторинг урожая пшеницы, поиск взаимосвязи вегетационного индекса (Greenness) и индексам площади листьев (LAI), чтобы иметь характеристики роста растений и оценки времени уборки урожая. Большинство исследователей сходится к мысли, что RGB-изображения, полученные с помощью БПЛА, с учетом соответствующей методической базой обработки могут стать полезным инструментом в задачах мониторинга СХ растений на всех фазах роста. Надо заметить, что работ, где выполнены пространственно-временные измерения RGB-изображений БПЛА не так уж и много, что связано с отсутствием устоявшейся методологической основой обработки. Для изучения многовременных изображений необходимо выполнять дополнительные работы на стадии предварительной обработки, связанные с геометрической и атмосферной коррекцией.

Процесс измерения достаточно простой и связан с разработкой определенного маршрута полета БПЛА, учетом перекрытия изображений между собой и получением ортофотоплана участка местности. Стоит отметить, что во время полета БПЛА, все полученные изображения имеют разные геометрические и радиометрические характеристики. Указанные характеристики зависят от времени съемки, высоты полета, различных углов обзора, характеристик цифровой камеры, скорости полета и т.д. В той или иной мере данные характеристики учитываются на уровне предварительной обработки полученных изображений. Созданные двумерные изображения исследуемой области (ортофотоплан) переходят на уровень тематической обработки.

Для получения изображения всей исследуемой территории заранее составляется траектория полета БПЛА, которая состоит из схемы параллельных линий, расстояние между которыми составляет примерно размер изображения цифровой камеры. Траектория полета должна обеспечивать достаточное количество изображений с учетом того, что они перекрываются так, чтобы никакие внешние условия (более всего ветер) не позволили получить разрывов изображений. Для этого выполняется прямое и боковое перекрытие между изображениями, чтобы успешно восстановить изображение всей исследуемой территории. Высота полета, фокусное расстояние камеры и размер датчика (RGB-матрицы) определяют размер территории, попадающей в изображение GSD (Ground Sampling Distance) или пространственное разрешение, и размер пикселя на земле GRC (Ground Resolution Cell). Определение подходящей высоты полета БПЛА является важным аспектом при решении практических задач точного земледелия.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что высота полета 30 м обеспечивает лучшую точность для картирования растительности на поле с использованием RGB-каналов, чем высота 60 м. Однако при более низкой высоте время облета территории поля существенно возрастает. Поэтому возникает компромисс между восстановлением пространственной детальности и временем полета.

Важной характеристикой БПЛА является цифровая камера и ее параметры: число пикселей изображения, светочувствительность, спектральные RGB-каналы. Число пикселей, с одной стороны, увеличивает детальность на изображении, но одновременно увеличивает время предварительной и тематической обработки. Спектральная форма RGB-каналов важна при получении, на стадии тематической обработки вегетационных индексов Greenness.

Формирование изображения БПЛА существенно зависит от солнечного излучения, которое распространяется в атмосфере до поверхности земли. Наличие аэрозольных образований на этой оптической трассе может существенно меняться каждый день или даже в течение дня. Кроме того, измерения с помощью БПЛА могут выполняться даже в присутствии сплошной облачности, когда существует только рассеянное излучение в облачных образованиях. Также часть измерений может иметь покрытие тенью от облака, а другая часть быть освещенной солнечным светом, что приводит к значительному изменению значений RGB-изображения. Поэтому для выравнивания световых характеристик изображения необходимо выполнять атмосферную коррекцию изображений БПЛА. Основной причиной, почему атмосферной коррекцией ранее пренебрегали, считалось, что для низких высот полета БПЛА наблюдается малое атмосферное ослабление. Однако атмосферное ослабление существенно меняется на оптической трассе распространения солнечного излучения до поверхности земли.

Расчет пропускания солнечного излучения видимой области спектра в атмосфере на различных траекториях, связанных с зенитным углом положения солнца, зависит от состава атмосферы и метеорологических параметров. Состав атмосферы связан с газовым и аэрозольным составом, который варьирует в течение дня и во время года, как и метеорологические параметры. Помимо естественных вариаций, в атмосфере существуют волновые процессы, которые связаны с рельефом местности, что важно знать при решении задач [21, 22].

Изучение типов поверхности, особенно растительности, требует точного знания их отражательной способности. Именно эта величина является основой расчета вегетационного индекса (для спутниковых многоспектральных изображений) [16, 17] и индекса зелени [18, 19]. Расчет по изображениям RGB-индекса зелени ExG или NGRDI, нормализованного индекса растительности рассматривается в статье. Приводится методика, позволяющая

улучшить точность оценки индексов, рассчитанных на основе RGB-изображений БПЛА:

$$ExG = (2G - R - B) / (R + G + B), \quad (1)$$

$$NGRDI = (G - R) / (G + R). \quad (2)$$

Объектом исследования является сельскохозяйственное поле в районе г. Томска (широта 56° и долгота 84,58°). Для получения изображений использован беспилотный летательный аппарат DJI Mavic с цифровой камерой. Измерения проводились каждую субботу для времени 11–13 ч дня, в течение июня, июля и августа, кроме дней, когда был дождь.

Структура программы

Для решения задач проекта была разработана структура программы (рис. 2) и на ее основе прототип программного продукта, работающий в консольном режиме, имитирующем работу интернет-системы. После отработки основных элементов программы в направлении обработки и анализа данных данная программа будет переведена на веб-платформу. За основу были взяты два набора данных, связанных с БПЛА и спутниковыми изображениями, согласованными по времени и территории.



Рис. 2. Структура программы обработки и анализа совместных данных БПЛА и спутников

Спутниковые данные брались в совпадающий день или наиболее близкий ко дню, когда выполнялось измерение с помощью БПЛА. Далее полученные данные записываются в файловое хранилище, откуда поступают для предварительной (выравнивание освещенности всех изображений с учетом положения Солнца и метеорологической информации) и тематической обработки (расчет индексов зелени и NDVI). Полученная информация является основой для пространственно-временного анализа изменения вегетационных индексов со временем, по территории поля, которая является исследуемой. Анализ позволяет выявить такие элементы сельскохозяйственных процессов, как всхожесть, скорость роста, заболевания, вызревание и т.д.

Важным агрибутом пакета программ является возможность построения регрессионной модели

зависимости вегетационных индексов, например от температуры и влажности атмосферы. Значения метеорологических параметров нами берутся с сайта [23], где по API можно получать информацию каждый час в формате json с привязкой WMS (web map service) для картографии [24].

Полученные результаты

Полеты БПЛА на высоте 30 м были выполнены над сельскохозяйственным полем, центр которого имеет координаты 56,46199567690829, 84,91686131500356, и которое показано на рис. 3 [25]. Белым прямоугольником на поле показан план полета (территория поля, для которого составляется определенный маршрут получения набора изображений, по которому строится ортофотоплан) беспилотного летательного аппарата. Для этой же территории получены спутниковые данные (многоканальные спектральные изображения) приборами Landsat-8 и Sentinel-2.



Рис. 3. Сельскохозяйственное поле, на территории которого были проведены измерения изображений БПЛА и спутниковыми приборами Landsat-8 и Sentinel-2

Далее для всех типов данных, согласно программе, структура которой представлена на рис. 2, выполнялись этапы предварительной и тематической обработки. Результат расчетов вегетационных индексов для спутникового прибора Sentinel-2 представлен на рис. 4, где каждый пиксель имеет размер 10×10 м. Анализируя рис. 4, можно сказать, что спутниковый прибор фиксирует неоднородность отражательных свойств растительности, что вполне достаточно для практического использования на практике. Так, напомним, что 1 га будет составлять 10×10 пикселей прибора Sentinel и 3×3 пикселя Landsat, а для БПЛА в нашем случае, если округлить разрешение пространственное до 2 см на пиксель, будет 500×500 пикселей.

Так как пространственное разрешение БПЛА при высоте полета 30 м составляет $P = 1,8 \text{ см/Пх}$ ($P [\text{см/Пх}] = (2 \cdot \text{tg}(a/2) \cdot H) / N_x$, где a – угол поля зрения камеры [град], H – высота полета [см] и N_x – число пикселей на изображениях по оси X), то нами проводился расчет среднего значения зелени для ячеек размером 10×10 м. Для этого изображение

зелености ExG разбивалось на ячейки, совпадающие по координатам со структурой ячеек Sentinel-2. Это необходимо было для совмещения сетки спутникового прибора Sentinel-2 и БПЛА. На рис. 4 показано изображение вегетационного индекса в части поля, чтобы была видна пиксельная структура (черным цветом показана область, которая не связана с зоной полета БПЛА).

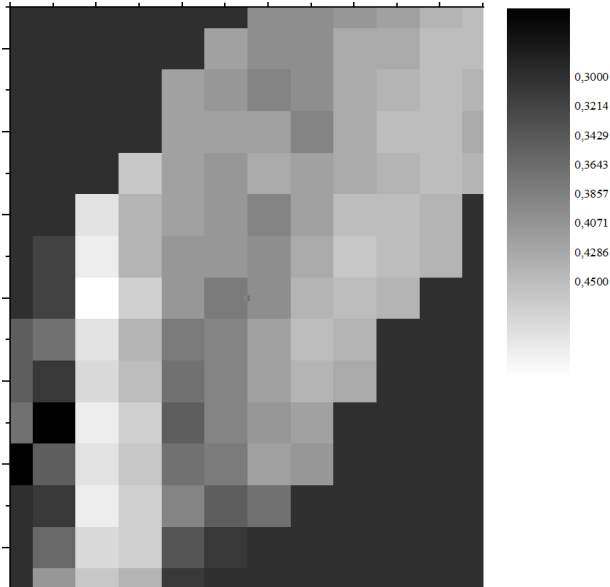


Рис. 4. Изображение вегетационного индекса по спутниковым данным Sentinel-2 (А)

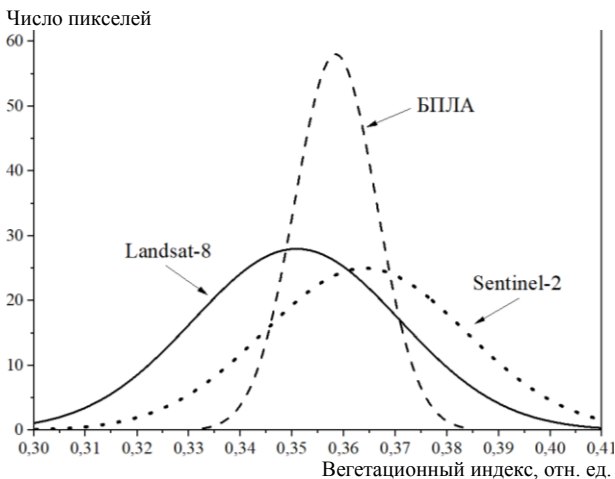


Рис. 5. Гистограммы распределения числа пикселей с значениями в районе исследуемого сельскохозяйственного поля для трех типов данных

Для этого же поля и времени проводилась обработка данных спутникового прибора Landsat-8, который имеет пространственное разрешение 30×30 м. Далее нами проводилась билинейная интерполяция результатов расчета вегетационного индекса до сетки 10×10 м. Это позволило нам совместить результаты трех измерений в виде гистограмм значений, которые показаны на рис. 5. Из рис. 5 видно, что значения всех трех измерений весьма близки, так, например, центр пика гистограммы значений Landsat-8 равен 0,35, для БПЛА – 0,357 и для Sentinel-2 –

0,363. Учитывая, что данные принадлежат трем разным измерителям, имеющих различные характеристики спектральных каналов, чувствительность и пространственное разрешение, отклонение составило не более 0,007 и 0,013. Близость значений спутниковой информации о растительности и БПЛА (рассчитанной только по RGB-значениям) приводит к возможности калибровки данных БПЛА, а также верификации спутниковых измерений.

Заключение

В работе представлено описание подхода к сравнению возможностей двух спутниковых приборов и цифровой RGB-камеры, установленной для БПЛА, для анализа растительности на сельскохозяйственном поле. Для этих целей были разработаны структура и сама программа, которая позволяет считывать данные спутниковых приборов Landsat-8 и Sentinel-2 для времени, близкого к получению изображений с помощью БПЛА. Спутниковые изображения были обработаны ранее разработанными программами и восстановлены вегетационные индексы NDVI. По данным измерений БПЛА на основе RGB-каналов рассчитан индекс зелености ExG. Далее, для выяснения совпадения значений спутниковых и БПЛА данных были выполнены преобразования пространственной сетки к масштабу прибора Sentinel-2 (10 м). Сравнение показало близость средних значений гистограмм распределений значений вегетационного индекса для трех типов спектральных приборов (0,35 – для Landsat-8, для БПЛА – 0,357 и для Sentinel-2 – 0,363). Результат сравнения позволяет увеличить возможность получать информацию о вегетационных индексах растительности на сельскохозяйственном поле в период наличия облачности, когда спутниковые данные недоступны.

Данная работа выполнена в Центре космического мониторинга земли (ЦКМЗ) ТУСУР при финансовой поддержке гранта РФФИ р_а 19-45-700008.

Литература

1. Maguire D.J. The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures / D.J. Maguire, P.A. Longley // Computers, environment and urban systems. – 2005. – Vol. 29. – P. 3–14.
2. ГОСТ Р 58571–2019. Инфраструктура пространственных данных. Требования к информационному обеспечению. – М., 2019. – 16 с.
3. Аверьянов М.А. Цифровая экономика. Трансформация отраслей / М.А. Аверьянов, С.Н. Евтушенко, Е.Ю. Кочетова // Экономические стратегии. – 2016. – Т. 18, № 8 (142). – С. 52–55.
4. Актуальные направления совершенствования аграрной политики России / И.Г. Ушачев, А.Ф. Серков, В.В. Маслова, В.С. Чекалин // АПК: Экономика, управление. – 2019. – № 3. – С. 4–16.
5. Ариничева И.В. Развитие цифровой экономики в аграрной сфере / И.В. Ариничева, С.С. Бессарабова, У.А. Лихота // Современные фундаментальные и прикладные исследования. – 2018. – № 2(29). – С. 36–38.
6. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») / Е.А. Лупян, И.Ю. Савин, С.А. Барталев, В.А. Толпин, И.В. Балашов, Д.Е. Плотников // Со-

временные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 1. – С. 190–198.

7. Agisoft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.agisoft.com>, свободный (дата обращения: 25.11.2020).

8. Gisinfo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gisinfo.ru>, свободный (дата обращения: 25.11.2020).

9. Sovzond [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sovzond.ru>, свободный (дата обращения: 25.11.2020).

10. Катаев М.Ю. Методы технического зрения для картирования состояния сельскохозяйственных полей / М.Ю. Катаев, К.С. Ёлгин, И.Б. Сорокин // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 75–80.

11. Катаев М.Ю. Интеллектуальный ситуационный центр, основанный на комплексировании космических и наземных данных / М.Ю. Катаев, А.А. Скугарев // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 61–64.

12. Xiang H. Method for Automatic Georeferencing Aerial Remote Sensing (RS) Images from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform / H. Xiang, L. Tian // Biosystems Engineering. – 2011. – Vol. 108. – P. 104–113.

13. Modis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://modis.gsfc.nasa.gov>, свободный (дата обращения: 25.11.2020).

14. Landsat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>, свободный (дата обращения: 25.11.2020).

15. Sentinel [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sentinel.esa.int>, свободный (дата обращения: 25.11.2020).

16. Кочубей С.М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики / С.М. Кочубей, Н.И. Кобец, Т.М. Шадшина. – Киев: Наукова думка, 1990. – 136 с.

17. Черепанов А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 28–32.

18. Ide R. Use of digital cameras for phenological observations / R. Ide, H. Oguma // Ecological Informatics. – 2010. – Vol. 5. – P. 339–347.

19. Color Indexes for Weed Identification under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions / D.M. Woebbecke, G.E. Meyer, K. Vonbargen, D.A. Mortensen // Trans. ASABE. – 1995. – Vol. 38. – P. 259–269.

20. Rokhmana S.A. The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia? / C.A. Rokhmana // Procedia Environmental Sciences. – 2015. – Vol. 24. – P. 245–253.

21. Маричев В.Н. Лидарные исследования термического режима стратосферы над Томском за 2012–2015 гг. // В.Н. Маричев, Д.А. Бочковский // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 1. – С. 28–37.

22. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 10. – С. 908–916.

23. Openweather [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://openweathermap.org>, свободный (дата обращения: 25.11.2020).

24. Web Map Service [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ogc.org/standards/wms>, свободный (дата обращения: 25.11.2020).

25. Google maps [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.google.com/maps>, свободный (дата обращения: 25.11.2020).

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ)

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85

Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Крылов Максим Олегович

Магистрант каф. АСУ ТУСУРf

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36

Эл. почта: maxkmo96@gmail.com

Гейко Павел Пантелеевич

Д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.

Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, профессор каф. оптико-электронных систем и дистанционного зондирования (ОЭСИДЗ)

Национального исследовательского

Томского государственного университета (НИ ТГУ)

Академический пр-т, д. 10, г. Томск, Россия, 634055

Тел.: +7-905-991-9762, +7 (382-2) 41-38-87

Эл. почта: ppg@imces.ru

Kataev M.Yu., Krylov M.O., Geiko P.P.

Software to compare images of the vegetation index obtained by satellite devices and unmanned aircraft

At present, the practice of supporting many types of human activities requires the use of the spatial data infrastructure. Such an infrastructure integrates spatio-temporal sets from many sources of information within itself, providing the user with various types of processing, analysis and visualization methods. This article describes the architecture of the software system and the processes for managing sets of spatio-temporal data to solve agricultural problems. Measurement data using multispectral satellite systems, unmanned aerial vehicles (UAVs), as well as a priori information (meteorology, agrochemical information, etc.) are taken as input information. The User of the Software System is provided with the opportunity to control the spatial information of the territory of agricultural fields, sets of temporal data from various spatial data. An important achievement of the work is the combination of the results of satellite and UAV images according to the controlled parameters, that makes possible to expand the area of use of UAVs and verify them. The results of real data processing are presented.

Keywords: satellite remote sensing devices, unmanned aerial vehicles, images, vegetation indices, program structure.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-4-63-70

References

1. Maguire D.J., Longley P.A. The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures. *Computers, environment and urban systems*, 2005, vol. 29. pp. 3–14.

2. GOST R 58571–2019. *Infrastructure for spatial data. Information support requirements*. Moscow, 2019, 16 p.

3. Averyanov M.A., Evtushenko S.N., Kochetova E.Yu. Digital economy. Transformation of industrie. *Economic strategies*, 2016, Vol. 18, no. 8 (142), pp. 52–55.

4. Ushachev I.G., Serkov A.F., Maslova V.V., Chekalin V.S. Actual directions of improving the agrarian policy of Russia. *APK: Economics, Management*, 2019, no. 3, pp. 4–16.

5. Arinicheva I.V., Bessarabova S.S., Likhota U.A. Development of the digital economy in the agricultural sector. *Modern fundamental and applied research*, 2018, no. 2 (29), pp. 36–38.
 6. Lupyan E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A. Satellite service for monitoring the state of vegetation («Vega»). *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2011, Vol. 8, no. 1, pp. 190–198.
 7. Agisoft [Electronic resource]. Available at: <https://www.agisoft.com>, free (Accessed: November 25, 2020).
 8. <https://gisinfo.ru> [Electronic resource]. Available at: <https://gisinfo.ru>, free (Accessed: November 25, 2020).
 9. Sovzond [Electronic resource]. Available at: <https://sovzond.ru>, free (Accessed: November 25, 2020).
 10. Kataev M.Yu., Yolgin K.S., Sorokin I.B. Methods of technical vision for mapping the state of agricultural fields. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 75–80.
 11. Kataev M.Yu., Skugarev A.A. Intelligent situational center based on the integration of space and ground data. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 61–64.
 12. Xiang 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.
 13. Modis [Electronic resource]. Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov>, free (Accessed: November 25, 2020).
 14. Landsat [Electronic resource]. Available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>, free (Accessed: November 25, 2020).
 15. Sentinel [Electronic resource]. Available at: <https://sentinel.esa.int>, free (Accessed: November 25, 2020).
 16. Kochubei S.M., Kobets N.I., Shadshina T.M. Spectral properties of plants as a basis for remote diagnostic methods. Kiev: Naukova Dumka, 1990, 136 p.
 17. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation indices. *Geomatics*, 2009, no. 3, pp. 28–32.
 18. Ide R., Oguma H. Use of digital cameras for phenological observations. *Ecological Informatics*, 2010, no. 5, pp. 339–347.
 19. Woebbecke D.M., Meyer G.E., Vonbargen K., Mortensen D.A. Color Indexes for Weed Identification under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions. *Trans. ASABE*, 1995, vol. 38, pp. 259–269.
 20. Rokhmana C.A. The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia? *Procedia Environmental Sciences*, 2015, vol. 24, pp. 245–253.
 21. Marichev V.N., Bochkovsky D.A. Lidar studies of the thermal regime of the stratosphere over Tomsk for 2012–2015. *Optics of the atmosphere and ocean*, 2018, vol. 31, no. 1, pp. 28–37.
 22. Kashkin V.B. Internal gravitational waves in the troposphere. *Optics of the atmosphere and ocean*, 2013, vol. 26, no. 10, pp. 908–916.
 23. <https://openweathermap.org> [Electronic resource]. Available at: <https://openweathermap.org>, free (Accessed: November 25, 2020).
 24. <https://www.ogc.org/standards/wms> [Electronic resource]. Available at: <https://www.ogc.org/standards/wms>, free (Accessed: November 25, 2020).
 25. <https://www.google.com/maps> [Electronic resource]. Available at: <https://www.google.com/maps>, free (Accessed: November 25, 2020).
-

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Automated Control Systems (ACS),
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

Maxim O. Krylov

Master Student, Department of ACS TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: maxkmo96@gmail.com

Pavel P. Geiko

Doctor of Physics and Mathematics,
Leading researcher employee, Monitoring institute climatic
and ecological systems SB RAS, Professor, Department
optoelectronic systems and remote sensing (OESiRS),
National Research Tomsk State University
10, Akademichesky pr., Tomsk, Russia, 634055
Phone: +7-905-991-9762, +7 (382-2) 41-38-87
Email: ppg@imces.ru