

<https://doi.org/10.15407/knit2019.06.039>

УДК 528.88

М. А. Попов, В. И. Лялько, С. А. Станкевич

Научный центр аэрокосмических исследований Земли
Института геологических наук Национальной академии наук
Украины, Киев, Украина

НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ: ПОИСК РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

В статье анализируются мировые тенденции современного дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Основной мировой тенденцией ДЗЗ является всестороннее информационное обеспечение реализации концепции устойчивого развития ООН. Это реализуется путём организации дистанционного мониторинга ряда обязательных и специфических показателей устойчивого развития территорий на национальном, региональном и глобальном уровнях. На основе проведённого анализа предлагаются и обосновываются направления развития ДЗЗ, приоритетные для Украины. К целям развития национальной системы ДЗЗ Украины следует отнести удовлетворение информационных потребностей отечественной промышленности, сельского хозяйства, бизнеса, науки и государственного строительства, включая укрепление обороноспособности. Определены основные сферы украинской экономики и деятельности государства, в которых применение спутниковой информации будет наиболее эффективным. К ним отнесены сельское хозяйство и природные ресурсы, экология, а также национальная оборона. Рассмотрены требования к спутниковой информации, специфические для каждой из указанных сфер. Отдельно освещены вопросы калибровки съёмочной аппаратуры, сертификации разрабатываемых методов и технологий с использованием создаваемого отечественного наземного полигона ДЗЗ.

Изложено новое видение формирования перспективной украинской спутниковой группировки ДЗЗ, которое целесообразно осуществлять по пространственно-иерархическому принципу. Затрагивается вопрос состава бортовой нагрузки перспективных отечественных спутниковых систем ДЗЗ. В частности, мировая проблема недостатка инфракрасных спутниковых изображений среднего разрешения может быть смягчена включением в состав бортовой съёмочной аппаратуры ДЗЗ перспективных украинских спутниковых систем инфракрасного спектрорадиометра с субпиксельной регистрацией и обработкой изображений для повышения их разрешения. Описан имеющийся в Украине задел в данной области.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, национальная система ДЗЗ, стратегия развития, международная кооперация в наблюдении Земли, национальные приоритеты ДЗЗ, бортовая нагрузка спутников ДЗЗ.

ВСТУПЛЕНИЕ

Украина входит в число стран, которые осуществляют разнообразную космическую деятельность, и одним из её компонентов является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). Нашей страной создано и запущено несколько спутников ДЗЗ, украинские учёные и специалисты разрабатывают новые методики и техноло-

гии решения тематических задач, в том числе в рамках международных проектов.

Однако достигнутые результаты ещё не полностью отвечают имеющемуся научному и научно-техническому потенциалам, поэтому весьма актуальным является вопрос выбора или корректировки стратегии дальнейшего развития отечественной системы ДЗЗ.

В современных условиях конкуренция в космической деятельности, в частности в ДЗЗ, уси-

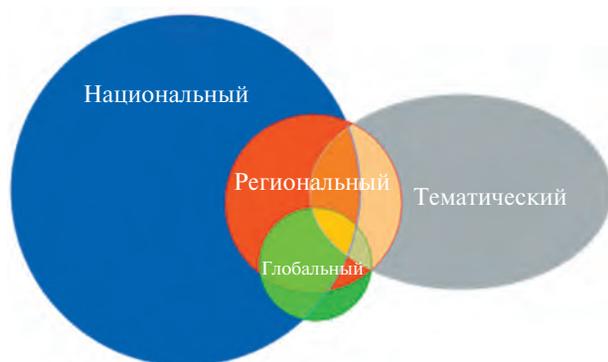


Рис. 1. Виды мониторинга показателей устойчивого развития

ливаются, многие государства и компании предлагают свои услуги в решении тематических задач ДЗЗ. Украина должна найти свою «экологическую нишу» ДЗЗ не только в интересах национального развития, но и для равноправного и эффективного включения в международную кооперацию. Для этого есть все основания, необходимо только проанализировать и выявить перспективные направления приложения усилий в области ДЗЗ с учётом как сложившейся в мире ситуации, так и имеющихся научных, технических и информационных наработок.

ТЕНДЕНЦИИ СОВРЕМЕННОГО МИРОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Как известно, в сентябре 2015 года на сессии Генеральной Ассамблеи Организации Объединённых Наций (ООН) странами-участницами была принята парадигма устойчивого развития мирового сообщества и сформулированы соответствующие цели (Sustainable Development Goals — SDG) и задания на период до 2030 года [6]. Цели носят глобальный характер, а их достижение основывается на результатах, получаемых отдельно каждой страной-участницей в ходе выполнения заданий, при этом она свободна в выборе пути достижения устойчивого развития и имеет возможность на этом пути решать наиболее актуальные и важные для неё задачи.

Обязательным элементом плана реализации концепции устойчивого развития является текущий контроль успешности выполнения сформулированных ООН задач. Для этого опреде-

ляются специальные показатели (их количество может быть более сотни), часть из которых является мандатными (т. е. входят в список обязательной отчетности на уровне всего сообщества), а часть показателей выбирается исходя из особенностей и специфических проблем данной страны и в основном используется на национальном уровне [3]. Каждая страна имеет возможность самостоятельно определять природу показателей, их характеристики, сроки и методы сбора данных и показателей в соответствии с национальными приоритетами и потребностями.

Примерами таких показателей могут служить оценки состояния земельных, лесных и водных ресурсов, урожайность сельскохозяйственных культур, показатели поиска и добычи полезных ископаемых, уровень загрязнённости атмосферы, техногенные нагрузки на природную среду, состояние дорожной инфраструктуры и др. При этом ко всем показателям предъявляются требования однозначности, достоверности, возможности сопоставления, строгого соответствия международным стандартам.

Показатели рассчитываются на основе данных, которые, в зависимости от физического содержания показателя, могут собираться разными способами и с помощью различных средств [3]. Мониторинг необходимых данных может выполняться на национальном, региональном и глобальном уровнях (рис. 1).

Национальный мониторинг является наиболее важным уровнем мониторинга и опирается на существующие в данной стране ведомственные и межведомственные системы сбора и анализа данных, государственные организации, акционерные, private и другие компании, работающие в соответствующей сфере деятельности.

Региональный мониторинг производится силами нескольких соседних стран и дает возможность получать согласованные экспертные оценки относительно функционирования и перспективных направлений дальнейшего развития общей инфраструктуры природных, урбанизированных, водных и других комплексов, расположенных на территориях этих стран.

Предметом глобального мониторинга являются показатели, которые несут в себе информа-

цию о текущем состоянии объектов планетарных пространственных размеров, например океанов, морей, отдельных материков и Земли в целом. Благодаря такой информации можно осуществлять координированную поддержку стратегий управления подобными объектами, определять, какие страны или регионы нуждаются в наибольшей помощи, и решать другие подобные задачи.

Прогресс в достижении устойчивого развития в значительной степени зависит от успехов в таких ключевых сферах человеческой деятельности, как сельское хозяйство, промышленность, энергетика, образование, подготовка кадров и др. В связи с этим, наряду с перечисленными выше применяемыми видами мониторинга, отдельными странами или группами стран может также выполняться тематический мониторинг (см. рис. 1), ориентированный на получение показателей текущего состояния в соответствующей сфере деятельности.

Справедливо считается, что одним из наиболее эффективных средств получения данных, на базе которых строятся оценки показателей устойчивого развития, являются системы и технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [10, 26]. К числу таких систем относятся, в первую очередь, система наблюдения Земли «Copernicus» и «система систем» наблюдения за планетой Земля GEOSS (Global Earth Observation System of Systems).

«Copernicus» — европейская система мониторинга окружающей среды, включающая группировку спутников «Sentinel» [26]. Орбитальная группировка «Sentinel» начала создаваться в 2014 году, в 2020 году в ней будет не менее десяти космических аппаратов с различными видовыми техническими средствами для формирования оптических многоспектральных и радиолокационных многополяризационных изображений земной поверхности разного пространственного разрешения (в основном — от 10 до 300 м на местности). Получаемая спутниками «Sentinel» информация предназначена для использования в мониторинге состояния земель, исследовании состава атмосферы, наблюдении пограничных территорий, в морских исследованиях, кризис-

ных ситуациях, в задачах изучения климатических изменений и др. Проект «Sentinel» финансируется Евросоюзом, общие затраты на период до 2027 года оцениваются в 5.8—7.0 млрд евро.

Система «Copernicus» зачастую рассматривается как европейская составляющая глобальной системы наблюдения за планетой Земля GEOSS [<https://www.earthobservations.org/activity.php?id=145>].

GEOSS представляет собой интегрированную систему, включающую множество независимых функционирующих подсистем, связанных, однако, в интересах решения общих задач [4]. Такими задачами являются прогноз погоды, мониторинг климатических изменений, контроль энергетических, водных, земельных ресурсов, изучение биоразнообразия, исследование последствий природных бедствий, управление сельским хозяйством и др. Подсистемы создаются и эксплуатируются разными странами, в их работе используется как спутниковая, так и наземная информация.

Начало создания системы GEOSS датируется 2005 годом, и с тех пор получено много важных прикладных результатов, включая разработку принципиально новых технологий ДЗЗ на основе самых современных моделей гео- и экосистем, создание информационных сервисов, адаптированных к потребностям конечного пользователя, и др.

Одна из задач системы GEOSS в ближайшей перспективе — обеспечить мониторинг показателей устойчивого развития SDG. Предполагается таким путем оперативно получать текущую информацию о ста глобальных показателях SDG, а также дополнительно отслеживать национальные показатели, которые в совокупности отображают весь спектр показателей SDG, связанных с окружающей средой [26].

Таким образом, в современном мире различные страны объединяют свои усилия и успешно создают коллективные системы наблюдения Земли, которые помогают, в частности, в решении такой актуальной и жизненно важной для человечества задачи, как переход к устойчивому развитию. Но, к сожалению, Украина пока не нашла своего достойного места в междуна-



Рис. 2. Распределение запущенных в течение 2017 года спутников по их функциональному предназначению

родном космическом сообществе. Изначально, после получения независимости, наша страна имела хороший научно-технический и производственный потенциал в космической отрасли. Этот потенциал позволял Украине в 1990-е годы входить в пятёрку стран, которые имели полный цикл производства ракет-носителей спутниковой аппаратуры.

В последующие годы было выведено на орбиту несколько украинских спутников ДЗЗ, рядом организаций (это Научный центр аэрокосмических исследований Земли, Государственный научно-производственный центр «Природа», Центр радиофизического зондирования Земли, Морской гидрофизический институт, Государственное предприятие «Днепрокосмос», Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины) разрабатывались новые методики решения тематических задач ДЗЗ, и некоторые из них нашли практическое применение. Однако нужно признать, что в целом за все годы каких-либо серьёзных успехов в украинской космонавтике достигнуто не было, а принимаемые в стране каждые пять лет национальные целевые космические программы хронически невыполнялись.

Но мировая космическая отрасль активно развивается: среднегодовой экономической рост в

последние 15 лет здесь составляет около 7 %, а по некоторым направлениям, в частности ДЗЗ, — 10—12 % [1]. На данное время полным циклом производства и запуска космических аппаратов обладают уже не пять, как это было в 1990-е годы, а 13 стран. Многие страны еще 20 лет тому назад вообще не интересовались космосом и его возможностями, сегодня имеют национальные спутники и даже группировки орбитальных космических аппаратов (таких стран насчитывается более 60).

В 2017 году количество спутников, запущенных разными странами в интересах наблюдения Земли, составило 49 % от общего количества запущенных спутников (рис. 2) [1]. В последние годы активно идёт процесс создания на орбите группировок, состоящих из десятков и даже сотен микро- и наноспутников («Skybox», «Dove» и др.), что уже дало возможность полного ежесуточного обновления данных о состоянии всей земной поверхности и природной среды.

Космические средства с такими возможностями являются одним из инструментальных рычагов, обеспечивающих переход общества и мировой экономики к новому технологическому укладу, в котором важную роль играют геоиндустрия, интеллектуальные информационные сервисы, технологии обработки больших объемов данных (Big Data), глобальные высокоскоростные телекоммуникации [26]. Поэтому одна из актуальных задач украинской космической отрасли — преодолеть имеющееся отставание от развитых стран в области дистанционных исследований и выйти на эффективную траекторию развития отечественного ДЗЗ.

Для Украины главной целью является создание космических средств, объединённых в национальную систему ДЗЗ, продукты деятельности которой максимально отвечают информационным запросам отечественной промышленности, сельского хозяйства, науки и бизнеса, а также способствуют укреплению обороноспособности страны. Стратегическим вопросом является также конкурентоспособность национальной системы ДЗЗ при информационном обеспечении глобальных и региональных задач в рамках парадигмы устойчивого развития.

Безусловно, стратегия развития отечественного ДЗЗ должна базироваться на имеющемся научно-техническом и производственном потенциале страны, международном опыте создания систем ДЗЗ и реализации крупных научно-технических программ и вместе с тем учитывать возможности и ресурсные ограничения отечественной экономики и промышленности. Анализ показывает, что лишь три страны в мире, это — США, КНР и РФ — присутствуют практически во всех секторах космонавтики, и в том числе в области наблюдения Земли. Достаточно сказать, что количество спутников, запущенных США за весь период космонавтики, составляет около 900, запущенных Китаем — порядка 300 и Россией — около 170. Суммарно это составляет до четверти всех запущенных в мире спутников.

Отметим, что в последнее десятилетие Китай активно наращивает свою космическую группировку; в 2018 г. эта страна вывела на орбиту 37 космических аппаратов, опередив по количеству запусков и США (34 запусков), и РФ (18 запусков). Такие достижения, безусловно, невозможны без значительных финансовых вложений: годовой бюджет Национального управления по аэронавтике и космосу США (NASA) составляет порядка 20—21 млрд долларов, а бюджеты Китая и России на космические исследования в 2018 г. оцениваются в сумму примерно 3 млрд долларов.

Другие страны тратят на космические исследования и разработки значительно меньшие суммы и, соответственно, их активность в космосе ниже. Что касается европейских стран, то во многих случаях они имеют возможность при реализации своих космических проектов опираться на финансовую поддержку Европейского космического агентства (ESA) с его годовым бюджетом порядка 5.5—6.0 млрд евро (заметим, что в этом бюджете на наблюдение Земли отводится обычно порядка 1.5 млрд евро). Так, Польша, выполняя в рамках Национальной космической программы на 2017—2021 гг. проект Earth Observation Envelope Programme стоимостью 9.7 млн евро, получает от ESA на его реализацию около 3.0 млн евро [5]. Украина, имеющая с 2015 года соглашение об ассоциации с Евросоюзом и участвующая в крупнейшей европейской иссле-

довательской программе «Horizon-2020», также имеет право на финансовую поддержку Евросоюза при создании новых систем ДЗЗ.

ПРИОРИТЕТЫ В ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМЛИ ДЛЯ УКРАИНЫ

Процесс создания национальной системы ДЗЗ должен начинаться с определения сфер жизнедеятельности государства и общества, в которых спутниковая информация наиболее востребована и может приносить наибольший эффект. Безусловно, составление и обоснование перечня таких сфер — сложная задача, решение которой в общем случае требует проведения большого объема технико-экономических, финансовых и других расчетов, знания и прогнозирования конъюнктуры международных рынков и т. д. Однако возможен и другой путь, а именно — обращение к методу экспертных оценок. Проведенный экспертами анализ показывает, что спутниковая информация наиболее востребована в Украине в таких сферах:

- сельское хозяйство и природные ресурсы,
- экология,
- оборона.

Сельское хозяйство и природные ресурсы.

Аграрный сектор формирует 14 % валового внутреннего продукта Украины и дает более 40 % валютной выручки. В стране функционирует целый ряд крупных агрохолдингов, развиваются фермерские хозяйства.

Производители сельскохозяйственной продукции сталкиваются с необходимостью решать такие задачи, как оценка посевных площадей, контроль всходов, определение влажности почв, прогнозирование урожайности основных сельскохозяйственных культур и др.

На территории нашей страны известно около 20 тысяч месторождений и больше 100 видов проявлений полезных ископаемых. По потенциальной стоимости подтвержденных извлекаемых запасов Украина занимает 12 место в мире (2.2 % потенциальной стоимости мировых запасов). Украина располагает большим количеством месторождений железных и марганцевых руд, запасами угля, нефти и газа. Мировой опыт свидетельствует, что для поиска и разведки ме-

сторожений полезных ископаемых все шире используют аэрокосмические методы [23].

Экология. Уровень загрязнения окружающей среды в Украине — один из самых высоких в Европе; тем не менее исследования ключевых экологических показателей — чистоты воздуха, качества питьевой воды, загрязнённости грунтов и т. д. проводятся только эпизодически. На исправление создавшейся ситуации направлен принятый в феврале 2019 г. Верховной Радой Украины закон «Об основных принципах (стратегии) государственной экологической политики Украины на период до 2030 года». Для реализации новой политики в области экологии в настоящее время разрабатывается Национальный план действий, предусматривающий мониторинг ключевых индикативных показателей окружающей среды, таких как уровни загрязнения воды и атмосферного воздуха, площади земель природно-заповедного фонда, состояние лесов, объёмы твердых бытовых отходов, экологические риски, климатические изменения и др. Важное место в таком мониторинге отводится методам ДЗЗ.

Оборона. Спутниковая информация позволяет решать широкий спектр задач относительно намерений и действий возможного агрессора — от наблюдения за процессом реализации его стратегических планов до выявления оперативно-тактических и тактических целей. Подобные задачи чрезвычайно актуальны для Украины, однако до сегодняшнего дня наша страна не имеет собственных спутников, которые обеспечивали бы военных потребителей видовой информацией требуемого пространственного разрешения.

Необходимо учитывать, что каждая сфера жизнедеятельности диктует свои специфические требования к качеству и оперативности необходимых спутниковых материалов, номенклатуре и содержанию информационных продуктов на их основе. И разработка, и обоснование таких требований — достаточно сложный и не до конца решённый вопрос. В то же время усилиями ряда международных организаций и комитетов (International Organization for Standardization — ISO, Committee of Earth Observation Satellites — CEOS и др.) достигнут значительный прогресс в

стандартизации геопрограммной, в том числе видовой спутниковой информации и способов её получения [2]. Международными стандартами определена совокупность форматов для представления изображений, установлены нормативные требования к качеству космических снимков (ISO-19113, ISO-19114, ISO-19138 и др.), согласованы уровни обработки изображений и их содержательное описание, стандартизованы метаданные (ISO-19115 и др.), создан классификатор бортовых сенсоров (ISO-19130, ISO-57 2003) и т. д.

Нужно отметить, что в Украине по инициативе Государственного космического агентства в начале 2000-х годов была начата работа по стандартизации в области ДЗЗ, в частности были разработаны и приняты три государственных стандарта, а именно:

- ДСТУ 4220:2003. Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять;
- ДСТУ 4758:2007. Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять;
- ДСТУ 7894:2015. Дистанційне зондування Землі з космосу. Методика оброблення даних. Порядок розроблення.

Однако дальнейшая работа по созданию отечественных стандартов в области ДЗЗ была остановлена по причине отсутствия финансирования. Между тем для выхода со своей космической продукцией на международный рынок Украине важно иметь стандартизованные методики калибровки различных видов бортовой съёмочной аппаратуры, процедуры сертификации методов и технологий решения тематических задач и пр.

Но калибровка съёмочной аппаратуры, сертификация разрабатываемых методов и технологий, их совершенствование невозможны без проведения наземных исследований и заверок. Поэтому одна из задач, требующих решения в самом ближайшем будущем — это создание отечественного полигона ДЗЗ, в составе которого должны быть научно-методические и информационно-измерительные средства для:

- проведения оценок пространственного разрешения бортовой аппаратуры;

- выполнение радиометрической калибровки бортовой аппаратуры и формирование информационных продуктов хотя бы первого уровня обработки;

- получения полевых (наземных) данных о реальных физических параметрах земной поверхности (в частности, распределений температур земных покровов, влажности почвы и её химического состава) и характеристиках растительности;

- создания и ведения баз спектральных данных (спектральных библиотек) природных объектов и др.

Такой полигон должен создаваться с учетом рекомендаций Международного комитета по спутникам наблюдения Земли (CEOS) и с перспективой вхождения в международную сеть калибровочно-валидационных полигонов ДЗЗ.

Тематические задачи перечисленных выше приоритетных для Украины сфер ДЗЗ имеют очень широкие диапазоны требований к пространственным и временным параметрам съёмки [12], которые невозможно выполнить при помощи некой единственной универсальной спутниковой системы. Особенно это проявляется в задачах, требующих оперативного просмотра больших территорий, часто — всей территории Украины, иногда — вместе с сопредельными территориями. В этом случае задача, как правило, невыполнима даже при наличии достаточно крупной спутниковой группировки однотипных аппаратов. Отсюда вытекает необходимость формирования пространственно-иерархической, возможно — виртуальной группировки, схема применения которой приведена на рис. 3 [8].

Пространственная иерархия ДЗЗ позволяет, путем последовательных съёмок разного разрешения — от низкого до сверхвысокого с соответственно уменьшающимся пространственным охватом, оптимизировать распределение имеющегося иконического ресурса по тематическим задачам. В частности, системы высокого (5...0.5 м на местности) и тем более сверхвысокого (лучше 0.5 м) пространственного разрешения практически неспособны покрыть национальную территорию за приемлемое время, и их следует применять пространственно-ограниченно,



Рис. 3. Пространственно-иерархическая схема дистанционного зондирования больших территорий

с учётом информации, предварительно полученной от систем среднего (50...5 м на местности) пространственного разрешения.

К ВОПРОСУ БОРТОВОЙ НАГРУЗКИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Для получения спутниковых данных при оценке показателей устойчивого развития SDG и решении других тематических задач необходимы бортовые сенсоры, по своим техническим характеристикам максимально адекватные физическим условиям задачи. Благодаря значительным достижениям в современном приборостроении номенклатура таких сенсоров достаточно широка; на сегодня созданы сенсоры, работающие в различных спектральных диапазонах и обеспечивающие получение спутниковых изображений самого высокого качества.

Вместе с тем есть определённые проблемы с получением качественных спутниковых тепловых изображений местности, хотя такие изображения являются важным информационным источником при решении многочисленных практических задач. В работе [7] приведены примеры более 30 приложений для использования спутниковых тепловых изображений. Среди них:

- выявление пожаров и пожароопасных ситуаций [17, 24],
- поиск полезных ископаемых [23, 25],

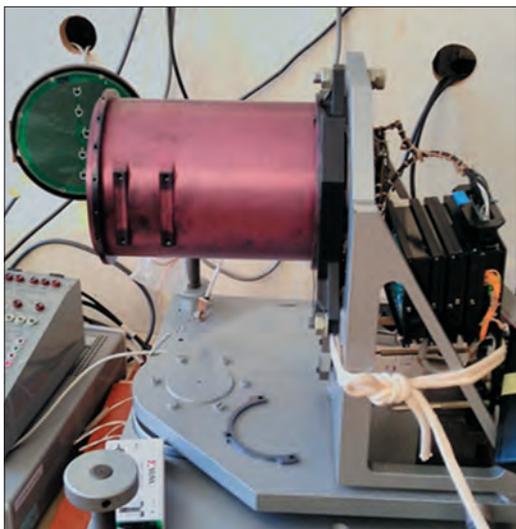


Рис. 4. Инженерный образец спутникового инфракрасного спектро радиометра на испытательном стенде КП СПБ «Арсенал»

- оценка и прогнозирование климатических изменений [11, 21],
- отслеживание вулканической активности и оценка угроз [14, 15],

- исследование температурных режимов водоемов и других природных объектов [13, 27] и т. д.

В этой связи представляется весьма перспективным включение в состав бортовой нагрузки отечественных спутников ДЗЗ инфракрасного спектро радиометра. Работы по созданию инфракрасного спектро радиометра принципиально новой конструкции с использованием для приема излучения матричного микроболометрического приёмника уже несколько лет ведутся в творческом содружестве учеными и специалистами двух организаций — Казённого предприятия специального приборостроения «Арсенал» и Научного центра аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук Национальной академии наук Украины [9, 20]. В конструкцию спектро радиометра заложен принцип субпиксельной регистрации и обработки кадров, что позволяет получать на выходе тепловые изображения повышенного пространственного разрешения (superresolution) [22]. Спектро радиометр имеет три рабочих спектральных диапазона в интервале длин волн от 8.5 до 13.5 мкм.

Использование матричного микроболометрического приёмника, не требующего охлаждения, дает возможности значительно уменьшить энергопотребление и улучшить массогабаритные характеристики прибора. Данная разработка защищена двумя патентами Украины [16, 19].

На данное время проведено научное обоснование возможности повышения пространственной разрешающей способности инфракрасных снимков, разработаны алгоритмы и программное обеспечение для субпиксельной обработки инфракрасных изображений, алгоритмы определения термодинамической температуры и зональных коэффициентов теплового излучения земной поверхности по инфракрасным изображениям.

Создан и проходит исследования инженерный образец инфракрасного спектро радиометра (рис. 4). Исследования показывают, что по радиометрическим характеристикам и пространственному разрешению спектро метр не уступает лучшим современным системам подобного предназначения (MODIS, «ChubuSat», TIRS).

Характеристики инженерного образца спектро радиометра [18]:

- тип фотоприёмника — микроболометрическая матрица 640×480 элементов размером 17 мкм;
- фокусное расстояние объектива — 112.8 мм;
- диафрагменное число — 1;
- количество рабочих спектральных диапазонов — 3 (10.5...11.5 мкм, 11.5...12.5 мкм, 8.0...13.5 мкм);
- количество одновременно обрабатываемых субпиксельно смещённых по двум осям изображений — 2;
- ожидаемое пространственное разрешение на местности — не хуже 73 м для орбиты высотой 668 ± 20 км и не хуже 53 м для орбиты высотой 490 ± 20 км.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что использование субпиксельной обработки позволяет повысить пространственное разрешение инфракрасных снимков в 1.4—1.8 раза по сравнению с возможностями приёмной матрицы.

Таким образом, имеется реальная перспектива создать украинский спутниковый инфракрасный спектро радиометр с техническими характеристиками на уровне лучших мировых образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены вопросы создания конкурентоспособной на международном рынке национальной системы ДЗЗ при информационном обеспечении глобальных и национальных задач в рамках парадигмы устойчивого развития.

Проанализированы тенденции современного мирового ДЗЗ и на основе этого анализа предложено три приоритетных для Украины направления развития отечественного ДЗЗ:

- 1) сельское хозяйство и природные ресурсы,
- 2) экология,
- 3) оборона.

Приведены сведения о новом кадровом инфракрасном спектрорадиометре, разрабатываемым в Украине, который может стать частью бортовой нагрузки перспективных отечественных спутников ДЗЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування*. За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. Київ: Наук. думка, 2006. 360 с.
2. Вишневецький В. І., Шевчук С. А. Оцінювання стану водних об'єктів Києва за даними дистанційного зондування Землі. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2016. № 11. С. 9—14.
3. Воробйов А. І., Голубов С. І. Можливість короткострокового прогнозу сильних землетрусів за матеріалами супутникових зйомок аномалій хмарності. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2018. № 19. С. 4—11.
4. Воробйов А. І., Лялька В. І., Мельниченко Т. А., Подорван В. М. Прояви аномалій хмарності на супутникових зображеннях перед сильними землетрусами. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2016. № 10. С. 21—25.
5. Ліщенко Л. П., Пазинич Н. В. Моніторинг стану торфовищ для виявлення пожежонебезпечних ділянок за допомогою дистанційних методів. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2016. № 8. С. 29—39.
6. Лялька В. І., Лихолит Н. І., Попов М. А., Станкевич С. А., Тягур В. М., Добровольська Е. В. *Целостная технология получения изображений повышенного пространственного разрешения от перспективного спутникового инфракрасного спектрорадиометра*. Тез. докладов 16-й Украинской конференции по космическим исследованиям. Одесса: ИКИ НАН и ГКА Украины, 2016. С. 225—226.
7. Лялька В. І., Попов М. О., Станкевич С. А., Шкляр С. В., Подорван В. М., Лихолит М. І., Тягур В. М., Добровольська К. В. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельної обробки зображень. *Наука та інновації*. 2015. Т. 11, № 6. С. 16—28.
8. *Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки*. За ред. В. І. Лялька. Київ: Наук. думка, 2015. 283 с.
9. *Патент України на винахід № 109181 С2* від 25.04.2015 р. Лихолит М. І., Лялька В. І., Попов М. О., Станкевич С. А., Тягур В. М., Харитоненко К. В. Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення.
10. *Патент України на винахід № 117909 С2* від 25.10.2018 р. Лялька В. І., Лихолит М. І., Попов М. О., Станкевич С. А., Тягур В. М., Добровольська К. В. Інфрачервоний матричний знімальний спектрорадіометр субпіксельної розрізненості
11. Попов М. А., Станкевич С. А., Шкляр С. В. Алгоритм підвищення розрешення субпіксельно сміщених зображень. *Математичні машини та системи*. 2015. № 1. С. 29—36.
12. *Спутниковые методы поиска полезных ископаемых*. Под ред. В. И. Лялька, М. А. Попова. Киев: Карбон, 2012. 436 с.
13. Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. 10, № 1. С. 254—266.
14. *Сучасні методи дистанційного пошуку корисних копалин*. За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. Київ: НАН України, 2017. 221 с. (Електронне видання).
15. Федоров О. П. *О космической деятельности: Подходы к разработке стратегии. Why Space for Ukraine?* Київ: Наук. думка, 2019. 200 с.
16. Янцевич О. О., Воробйов А. І., Гейхман А. М. Оцінка природи температурних аномалій на космознімках Чорного моря. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2016. № 9. С. 36—39.
17. De Concini A., Toth J. The future of the European space sector: How to leverage Europe's technological leadership and boost investments for space ventures / European Commission by Innovation Finance Advisory in collaboration with the European Investment Advisory Hub, part of the European Investment Bank's advisory services. 2019. 362 p.
18. *Handbook of geographic information*. W. Krasse, D. M. Danko (Eds). Berlin: Springer-Verlag, 2012. 1120 p.
19. Indicators and a monitoring framework for the sustainable development goals. Launching a data revolution for the SDGs / A report by the Leadership Council of the sustain-

- able development solutions network revised working draft (version 7), 2015. URL: <http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2015/05/Final-SDSN-Indicator-Report-Web.pdf> (дата обращения 27.05.2019).
20. Koike T., Onodab M., Cripe D., Achache J. The Global Earth Observation System of Systems (GEOSS): Supporting the needs of decision making in societal benefit areas. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Science*. 2010. **38**, part 8. P. 164–169.
 21. Lyalko V. I., Popov M. A., Stankevich S. A., Shklyar S. V., Podorvan V. N., Likholt N. I., Tiagur V. M., Dobrovolska C. V. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution. *J. Information, Control and Management Systems*. 2014. **12**, No. 2. P. 153–164.
 22. Polish Space Agency eyes \$420M program to develop satellites, space R&D. Space News, March 6, 2018. URL: <https://spacenews.com/polish-space-agency-eyes-420m-program-to-develop-satellites-space-rd/> (дата обращения 27.05.2019).
 23. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. 70/1. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. 35 p.
 24. Simmons A., Fellous J., Ramaswamy V. et al. Observation and integrated Earth-system science: a roadmap for 2016–2025. *Advances in Space Research*. 2016. **57**, No. 10. P. 2037–2103.
 25. Sobrino J. A., Del Frate F., Drusch M., Jimenez-Munoz J. C., Manunta P., Regan A. Review of thermal infrared applications and requirements for future high-resolution sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2016. **54**, No. 5. P. 2963–2972.
 26. Stankevich S. A., Dugin S. S., Gerda M. I. Spectral features handling for compact targets detection in satellite images. *Theses of the 7th International Conference “Space Technologies: Present and Future”*. Dnieper: Yuzhnoye State Design Office, 2019. P. 180–181.
 27. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*. 2003. **86**, No. 3. P. 370–384.
 4. Vorobiev A. I., Lyalko V. I., Melnichenko T. A., Podorvan V. M. (2016). Displays of clouds anomalies on the satellite images before strong earthquakes. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, **10**, 21–25 [in Ukrainian].
 5. Lischenko L. P., Pazynych N. V. (2016). Monitoring of peat bogs areas to identify fire hazards by remote sensing. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, **8**, 29–39 [in Ukrainian].
 6. Lyalko V. I., Likholt N. I., Popov M. A., Stankevich S. A., Tiagur V. M., Dobrovolska E. V. (2016). *Integrated technique for enhanced spatial resolution images acquisition from future satellite infrared spectroradiometer*. Theses of the 16th Ukrainian Conference on Space Research. Odessa: SRI NAS and SSA of Ukraine, 225–226 [in Russian].
 7. Lyalko V. I., Popov M. O., Stankevich S. A., Shklyar S. V., Podorvan V. M., Lykholit M. I., Tiagur V. M., Dobrovolska K. V. (2015). Physical simulator of infrared spectroradiometer with spatial resolution enhancement using subpixel image registration and processing. *Science and Innovation*, **11**(6), 16–28 [in Ukrainian].
 8. Lyalko V. I. (Ed.). (2015). *Greenhouse effect and climate changes in Ukraine: assessments and consequences*. Kiev: Nauk. Dumka. 283 p. [in Ukrainian].
 9. *Patent of Ukraine No 109181 C2*, 25.04.2015. Lykholit M. I., Lyalko V. I., Popov M. O., Stankevich S. A., Tiagur V. M., Kharytonenko K. V. Method and system for image resolution enhancement using subpixel shifts [in Ukrainian].
 10. *Patent of Ukraine No 117909 C2*, 25.10.2018. Lyalko V. I., Lykholit M. I., Popov M. O., Stankevich S. A., Tiagur V. M., Dobrovolska K. V. Infrared imaging spectroradiometer with super-resolution [in Ukrainian].
 11. Popov M. A., Stankevich S. A., Shklyar S. V. (2015). An algorithm for resolution enhancement of subpixel displaced images. *Mathematical Machines and Systems*, **1**, 29–36 [in Russian].
 12. Lylako V. I., Popov M. A. (Eds.). (2012). *Satellite methods for minerals prospecting*: Kiev: Carbon. 436 p. [in Russian].
 13. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Luopian E. A. (2013). Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, **10**(1), 254–266 [in Russian].
 14. Lylako V. I., Popov M. O. (Eds.). (2017). Novel remote sensing methods for minerals prospecting. Kiev: NAS of Ukraine, 221 p. [in Ukrainian].
 15. Fedorov O. P. (2019). On space activities: approaches to strategy development. Why space for Ukraine? Kiev: Nauk. Dumka, 200 p. [in Russian].
 16. Yanzevich O. O., Vorobiev A. I., Geykhman A. M. (2016). An estimation of nature of temperature anomalies on the space images of the Black Sea, *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, **9**, 36–39 [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 01.07.2019

REFERENCES

1. Lyalko V. I., Popov M. O. (Eds.). (2006). *Multispectral remote sensing in nature management*. Kiev: Nauk. Dumka. 360 p. [in Ukrainian].
2. Vyshnevskiy V. I., Shevchuk S. A. (2016). Evaluation of status of Kyiv water bodies using remote sensing data. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, **11**, 9–14 [in Ukrainian].
3. Vorobiev A. I., Golubov S. I. (2018). A possibility of the short-term strong earthquakes forecasting on materials of cloudiness anomalies satellite surveys. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, **19**, 4–11 [in Ukrainian].

17. De Concini A., Toth J. (2019). The future of the European space sector: how to leverage Europe's technological leadership and boost investments for space ventures. *European Commission by Innovation Finance Advisory in collaboration with the European Investment Advisory Hub, part of the European Investment Bank's advisory services*. 362 p.
18. Krasse W., Danko D. M. (Eds.) (2012). *Handbook of geographic information*. Berlin: Springer-Verlag.
19. Indicators and a monitoring framework for the sustainable development goals. Launching a data revolution for the SDGs. *A report by the Leadership Council of the sustainable development solutions network revised working draft, version 7*, (2015). URL: <http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2015/05/Final-SDSN-Indicator-Report-Web.pdf> (Last accessed 01.07.2019).
20. Koike T., Onodab M., Cripe D., Achache J. (2010). The Global Earth Observation System of Systems (GEOS): supporting the needs of decision making in societal benefit areas. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, **38** (8), 164—169.
21. Lyalko V. I., Popov M. A., Stankevich S. A., Shklayr S. V., Podorvan V. N., Likhohol N. I., Tiagur V. M., Dobrovol'ska C. V. (2014). Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution. *Journal of Information, Control and Management Systems*, **12**(2), 153—164.
22. Polish Space Agency eyes \$420M program to develop satellites, space R&D. *Space News*, March 6, (2018). URL: <https://spacenews.com/polish-space-agency-eyes-420m-program-to-develop-satellites-space-rd/> (Last accessed 01.07.2019).
23. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. **70/1**. *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*, 35 p.
24. Simmons A., Fellous J., Ramaswamy V., et al. (2016). Observation and integrated Earth-system science: a roadmap for 2016—2025. *Advances in Space Research*, **57**(10), 2037—2103.
25. Sobrino J. A., Del Frate F., Drusch M., Jimenez-Munoz J. C., Manunta P., Regan A. (2016). Review of thermal infrared applications and requirements for future high-resolution sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **54**(5), 2963—2972.
26. Stankevich S. A., Dugin S. S., Gerda M. I. (2019). *Spectral features handling for compact targets detection in satellite images*. Theses of the 7th International Conference “Space Technologies: Present and Future”. Dnieper: Yuzhnoye State Design Office, 180—181.
27. Voogt J. A., Oke T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, **86**(3), 370—384.

Received 01.07.2019

М. О. Попов, В. І. Лялько, С. А. Станкевич

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук
Національної академії наук України,
Київ, Україна

НАЦІОНАЛЬНА СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ: ПОШУК РАЦІОНАЛЬНИХ РІШЕНЬ

У статті аналізуються світові тенденції сучасного дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Основною світовою тенденцією ДЗЗ є усебічне інформаційне забезпечення реалізації концепції сталого розвитку ООН. Це реалізується шляхом організації дистанційного моніторингу низки обов'язкових і специфічних показників сталого розвитку територій на національному, регіональному та глобальному рівнях. На основі проведеного аналізу пропонуються та обґрунтовуються напрями розвитку ДЗЗ, пріоритетні для України. До цілей розвитку національної системи ДЗЗ України слід віднести задоволення інформаційних потреб вітчизняної промисловості, сільського господарства, бізнесу, науки і державного будівництва, включаючи зміцнення обороноздатності. Визначено основні сфери української економіки та діяльності держави, в яких застосування супутникової інформації буде найбільш ефективним. До них віднесено сільське господарство і природні ресурси, екологію, а також національну оборону. Розглянуто вимоги до супутникової інформації, специфічні для кожної з вказаних сфер. Окремо освітлено питання калібрування знімальної апаратури, сертифікації розроблюваних методів і технологій з використанням створюваного вітчизняного наземного полігону ДЗЗ.

Викладено нове бачення формування перспективного українського супутникового угруповання ДЗЗ, яке доцільно здійснювати за просторово-ієрархічним принципом. Обговорюються питання складу бортового навантаження перспективних вітчизняних супутникових систем ДЗЗ. Зокрема, світову проблему нестачі інфрачервоних супутникових зображень середньої розрізненності можна пом'якшити включенням до складу бортової знімальної апаратури ДЗЗ перспективних українських супутникових систем інфрачервоного спектродіометра із субпіксельною реєстрацією та обробкою зображень для підвищення їхньої розрізненності. Описано наявний в Україні доробок в цій галузі.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, національна система ДЗЗ, стратегія розвитку, міжнародна кооперація в спостереженні Землі, національні пріоритети ДЗЗ, бортове навантаження супутників ДЗЗ.

М. А. Попов, В. І. Лялько, С. А. Станкевич

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth,
IGS NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

UKRAINIAN NATIONAL SYSTEM
FOR EARTH'S REMOTE SENSING:
LOOK FOR EFFICIENT SOLUTIONS

Worldwide trends in modern remote sensing of the Earth are analyzed in this paper. The main trend of remote sensing in the world is the comprehensive information support for the implementation of the UN's sustainable development concept. This is achieved by remote monitoring of a number of mandatory and specific indicators of the territories' sustainable development at national, regional, and global levels. The priority direction of the remote sensing progress in Ukraine is outlined and substantiated using such analysis outcomes. The goals of the development of the national remote sensing system of Ukraine should include meeting the information needs of the domestic industry, agriculture, business, science, and statecraft, including the defense potential strengthening. The primary domains of the Ukrainian economy and state activities are identified, in which the satellite information engage-

ment will be most efficient. Ones include agriculture and natural resources, environmental protection, as well as national defense. The requirements for satellite information specific to each of these domains are considered. The issues of imaging systems' calibration, developed methods, and technologies certification using the engineered domestic ground test site for remote sensing are highlighted separately.

A new vision for the formation of a future Ukrainian remote sensing satellite constellation is explicated, which is advisable to carry out under the spatial-hierarchical principle. The subject of on-board payload composition for future national remote sensing satellite systems is discussed. In particular, the known worldwide problem of the lack of medium-resolution thermal infrared satellite imagery can be mitigated by the implementation of the enhanced spatial resolution infrared spectroradiometer with subpixel image registration and processing into future Ukrainian remote sensing satellite systems. The experience in this area available in Ukraine is described.

Keywords: remote sensing of the Earth, the national remote sensing system, development strategy, international cooperation in Earth observation, national remote sensing priorities, on-board payload of remote sensing satellites.