

Опыт использования беспилотных летательных аппаратов для проведения аэрогаммасъемки территорий

Статья посвящена опыту применения программно-аппаратных средств для проведения аэрогаммасъемки территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению, при помощи беспилотных летательных аппаратов. Показано историческое развитие приборного парка в связи со стремительной эволюцией электронных компонентов и оптимизацией методов проведения радиационной разведки. Описано современное промышленно выпускаемое устройство для проведения аэрогаммасъемки, пригодное для использования с практически любыми летательными аппаратами грузоподъемностью свыше 0,9 кг. Рассмотрены перспективы развития аэрогаммасъемки.

Ключевые слова:

аэрогаммасъемка, аппаратный спектр, радиационная разведка, мощность дозы, беспилотный летательный аппарат.

**С.Л.Гаврилов, А.Е.Пименов,
А.М.Шведов, С.А.Шикин,
В.Ю.Яковлев**
(ИБРАЭ РАН, г. Москва)

Ю.Н.Мартынюк
(НПП «Доза», г. Зеленоград)

А.Н.Пугачев
(ЗАО «НПЦ «Аспект», г. Дубна)

Впервые метод аэрогаммасъемки был применен в СССР в 1946 г. в работах под научным руководством академика Д.И. Щербакова и профессора В.И. Баранова. Первые экспериментальные измерения проводились над искусственными радиоактивными источниками и месторождениями Кураминского хребта (Тянь-Шань) с приборами ЯГ-1 и ЯГ-2, разработанными в 1946–1947 гг. [1].

А уже в 1949 г. метод впервые был применен для целей радиоэкологического мониторинга во время испытаний первой советской атомной бомбы.

Местоположение самолета (вертолета) для географической привязки измерений в первые годы определяли путем фотографирования



академик Д.И.Щербаков



профессор В.И.Баранов

Рис.1. Научные руководители первых работ в СССР по применению метода аэрогаммасъемки.

местности или при помощи радиогодезических навигационных систем.

В дальнейшем метод аэрогаммасъемки активно развивался и все более широко применялся для поисков месторождений руд урана, цветных металлов, фосфоритов, а также для планомерного радиационного мониторинга территорий. Очень широко метод использовался для разведки радиационных загрязнений территорий, образовавшихся как в результате аварии на Чернобыльской АЭС, так и в результате других радиационных аварий.

В последние 10–15 лет происходит бурное развитие беспилотной авиации. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся все более совершенными и при этом все более доступными. Эта тенденция совместно с продолжающейся миниатюризацией электронных компонентов сделала возможным создание малогабаритных комплексов аэрогаммасъемки для использования с БПЛА.

Сам метод аэрогаммасъемки является очень эффективным и оперативным, так как позволяет провести радиационные измерения на достаточно больших территориях в сжатые сроки и с хорошим пространственным разрешением.

Использование БПЛА для этих целей позволяет отказаться от дорогостоящей авиационной

техники, а также не подвергать персонал опасности переоблучения при проведении измерений на сильно загрязненных территориях.

В статье отражена эволюция используемых в ИБРАЭ РАН (совместно с партнерами) методов и средств для проведения аэрогаммасъемки, а также текущая ситуация по применению мультикоптерных БПЛА. Такие БПЛА имеют ряд преимуществ:

способность выполнять полеты на небольшой высоте и с малой скоростью, автоматизированные процедуры взлета, съемки и посадки, возможность детализации выявленных аномалий методом зависания над ними или приземления для набора спектров, способность осуществлять съемку вертикальных поверхностей за счет использования гиростабилизированного подвеса спектрометра и т. п.

Аэрогаммасъемка с использованием пилотируемых ЛА

Первым опытом ИБРАЭ РАН по разработке и использованию методов аэрогаммасъемки стало создание в 2008–2010 гг. совместно НПП «Доза» и НПЦ «Аспект» аэрогамма-спектрометрического измерительного комплекса (ИК АГСК) для использования на пилотируемых вертолетах [2]. Разработанный комплекс состоял из измерительного блока с габаритами 970×300×470 мм и весом 50 кг с окном из светопрозрачного материала для обеспечения работы цифрового фотоаппарата в нижней части с узлом крепления, содержащим виброопоры, и защищенного ноутбука с программным обеспечением. Измерительный блок ИК АГСК был выполнен на основе гамма-спектрометра со сцинтилляционным детектором

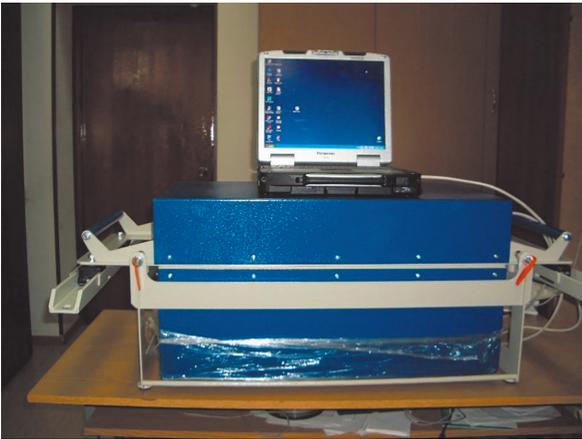


Рис.2. Внешний вид ИК АГСК.

УДС-ГЦ-102×102×406-RS производства НПЦ «Аспект». Внешний вид ИК АГСК в лабораторных условиях и его размещение в люке внешней подвески вертолета МИ-8 показаны на рис.2 и 3.

Были проведены испытания ИК АГСК, состоящие из серии полетов, в ходе которых производилась регистрация гамма-излучения от естественных радионуклидов, и тестирования принятых в ходе разработки решений. При этом был выявлен ряд проблем, связанных с оперативностью и стоимостью организации полета, в то время как в условиях аварийной ситуации, когда существует необходимость провести обследование в течение нескольких часов или суток, промедление недопустимо. В связи с этим за период с 2009 по 2012 гг. был создан портативный АГСК для использования с БПЛА вертолетного типа.

Аэрогаммасъемка с использованием БПЛА

В первых разработках ИБРАЭ РАН использовался БПЛА md4-1000 (рис.4.) фирмы Microdrones, Германия. БПЛА построен по схеме «квадрокоптер» и представляет собой дистанционно управляемую и автономно летающую платформу со встроенной систе-



Рис.3. Размещение ИК АГСК в люке МИ-8 – вид снизу.

мой навигации на основе GPS. Максимальная масса полезной нагрузки составляла 1,2 кг. Выбор данного аппарата был обусловлен хорошим по сравнению с другими доступными на тот момент моделями соотношением таких характеристик как надежность, грузоподъемность (способность брать в качестве полезной нагрузки измерительный блок и аппаратуру для фото- и видео съемки) и массогабаритные параметры.

На БПЛА крепится навесное оборудование в виде специально разработанного совместно с НПЦ «Аспект» универсального портативного устройства детектирования гамма-излучения УДКГ-А01, которое подключается к контроллеру БПЛА [3]. Конструктивно УДКГ-А01 (рис.5.) размещен в тонкостенном алюминиевом цилиндрическом корпусе.



Рис.4. АГСК на БПЛА Microdrones.

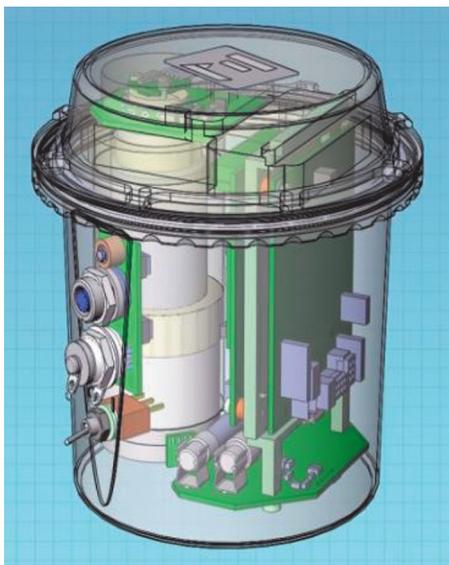


Рис.5. Устройство детектирования гамма-излучения УДКГ-А01.

Корпус детектора обеспечивает степень защиты от проникновения твердых предметов и воды, соответствующую IP65 (пыленепроницаемость, защита от водяных струй с любого направления). Внутри корпуса находятся: сцинтиллятор – кристалл NaI(Tl) Ø31×31 мм; ФЭУ R7111; делитель высокого напряжения; а также вся необходимая электроника и два счетчика Гейгера-Мюллера. Для защиты от пониженных температур и внешних механических воздействий вся внутренняя начинка устройства закреплена при помощи упругого материала – экструдированного вспененного

полистирола. Устойчивость изделия к изменению магнитного поля обеспечивается применением магнитного экрана из специального магнитомягкого сплава (пермаллоя).

Для компенсации нестабильностей, присущих сцинтилляционным детекторам, таких как старение ФЭУ, зависимость световыхода кристалла от температуры, коэффициента усиления ФЭУ от загрузки, устройство детектирования имеет систему стабилизации тракта, работу которой обеспечивают светодиод, датчик температуры кристалла и соответствующая электроника.

Особенностью УДКГ-А01 является то, что в диапазоне $10^{-7} \div 10^{-4}$ Зв/ч оценка мощности дозы выполняется по данным спектрометра, в то время как диапазон $10^{-4} \div 10^{-1}$ Зв/ч обеспечивают два счетчика Гейгера-Мюллера с различной чувствительностью.

Передача телеметрических данных производится по радиоканалу БПЛА. Полученные сигналы декодируются и подготавливаются для использования на ноутбуке с использованием специализированного программного обеспечения Microdrones. Телеметрическая информация, передаваемая с БПЛА на наземную станцию, включает в том числе пользовательские данные от УДКГ-А01. Для географической привязки используется бортовая система GPS БПЛА.

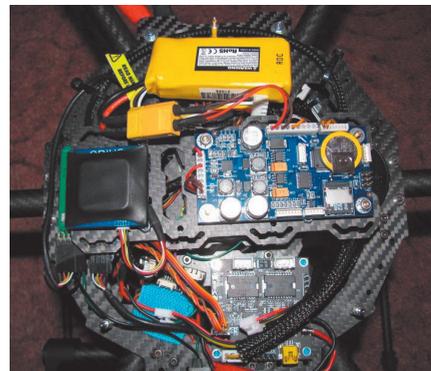


Рис.6. АГСК на БПЛА К-680 и размещение контроллера внутри корпуса БПЛА.



Рис. 7. АГСК на БПЛА DJI Matrice 210RTK.

Данный вариант АГСК был успешно протестирован во время серии полетов над территорией Брянской области [4], загрязненной радионуклидом Cs-137 в результате аварии на Чернобыльской атомной станции.

К недостаткам такого решения можно отнести использование специфического телеметрического радиоканала и бортового GPS, а также существенное повышение с течением времени рыночных цен на md-41000 Microdrones, что сделало затруднительным использование АГСК с данным конкретным БПЛА. Это способствовало проведению работ по модифика-



Рис. 8. Вид измерительного блока УДКГ-А02 с контроллером полезной нагрузки и модулем электропитания.

ции УДКГ-А01 для использования с широкой линейкой летательных аппаратов, обладающих необходимой грузоподъемностью.

Следующим этапом разработки стал АГСК на базе того же устройства детектирования УДКГ-А01 с дополнительным контроллером, радиоканальной парой 3D Robotics и GPS приемником, размещенными внутри БПЛА типа К-680/1200 китайского производства

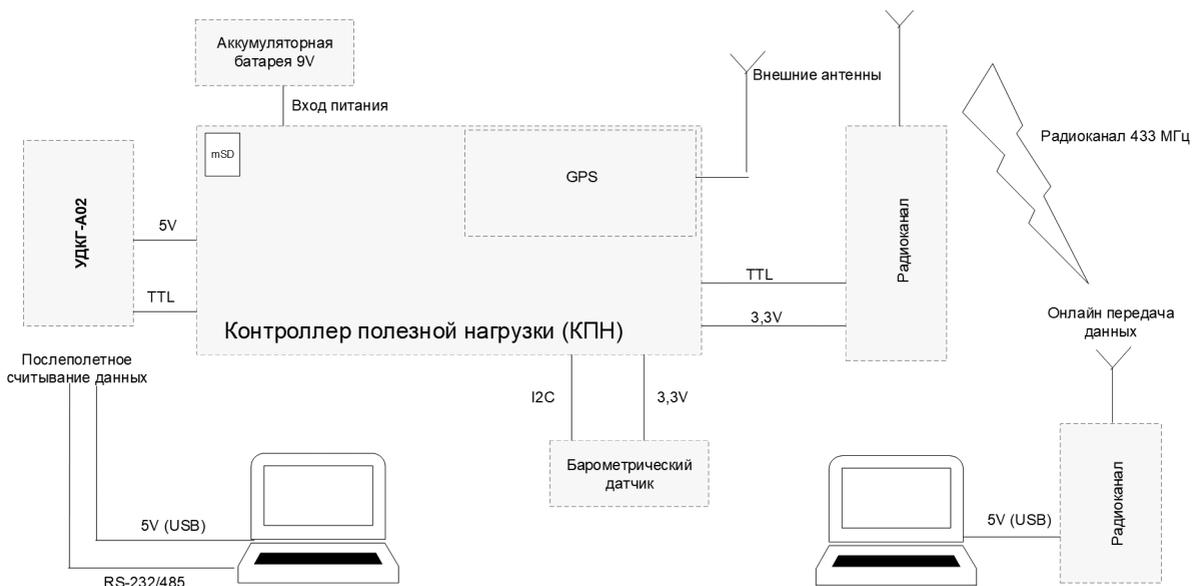


Рис. 9. Структурная схема АГСК.

(рис.6.). Питание АГСК осуществляется от бортовой системы электропитания БПЛА.

Анализ рынка и опыта использования БПЛА показал эффективность и хорошую надежность БПЛА производства DJI (Китай), однако конструкционные особенности данных аппаратов не позволяют без нарушения гарантии подключаться к электронным компонентам БПЛА. В результате возникла задача разработки полностью независимого от БПЛА устройства детектирования весом не более 1 кг. Это привело к созданию в 2018 г. АГСК на базе устройства детектирования гамма-излучения УДКГ-А02. Пример размещения УДКГ-А02 на БПЛА DJI Matrice 210RTK показан на рис.7.

Измерительный блок УДКГ-А02 (рис.8.) характеризуется увеличением диапазона измеряемых значений мощностей доз до 1 Зв/ч, а также расширением диапазона рабочих температур от -30 до $+50$ °С. Вес прибора составляет 0,9 кг. Данный вариант АГСК включает в себя контроллер полезной нагрузки с модулем GPS, барометр и модуль электропитания с использованием Li-ion аккумуляторной батареи форм-фактора «крона» напряжением 9 V и емкостью 650 mAh.

Структурная схема АГСК приведена на рис.9. АГСК может работать как в режиме online, передавая значения мощности дозы через радиоканал с частотой 433 МГц на наземную станцию, так и накапливая в энергонезависимой памяти УДКГ-А02 данные измерений с привязкой по времени, высоте и координатам, которые после проведенного полета могут быть переданы на ПЭВМ.

С первых этапов разработки аэрогамма-спектрометрических комплексов наряду с аппаратной частью велась работа по созданию прикладного программного обеспечения (ППО). В настоящий момент ППО включает в себя набор программ, осуществляющих обработку данных АГСК как в режим online, так и после полета, а также установку параметров и получение данных измерений из внутренней памяти измерительного блока. В том числе позволяет устанавливать границы энергетического окна, счет в котором будет поступать на землю в режиме online, проводить калибровку энергетической шкалы гамма-спектрометра, запись калибровочных коэффициентов гамма-спектрометра и счетчиков Гейгера-Мюллера во внутреннюю память УДКГ, а также считывание накопленной в ходе полетов базы данных измерений на ноутбук пользователя.

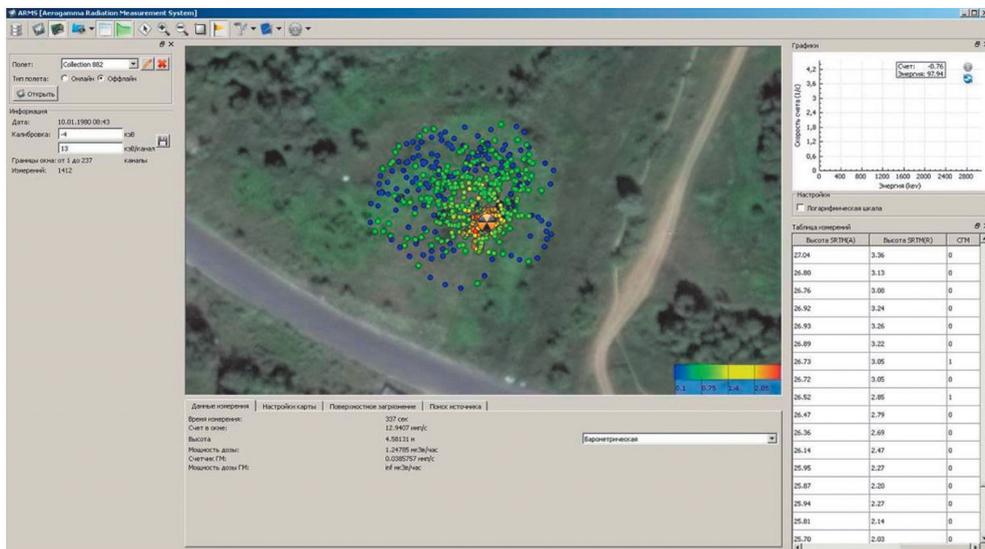


Рис.10. Внешний вид основного рабочего окна программного обеспечения по приему и предварительному анализу данных.

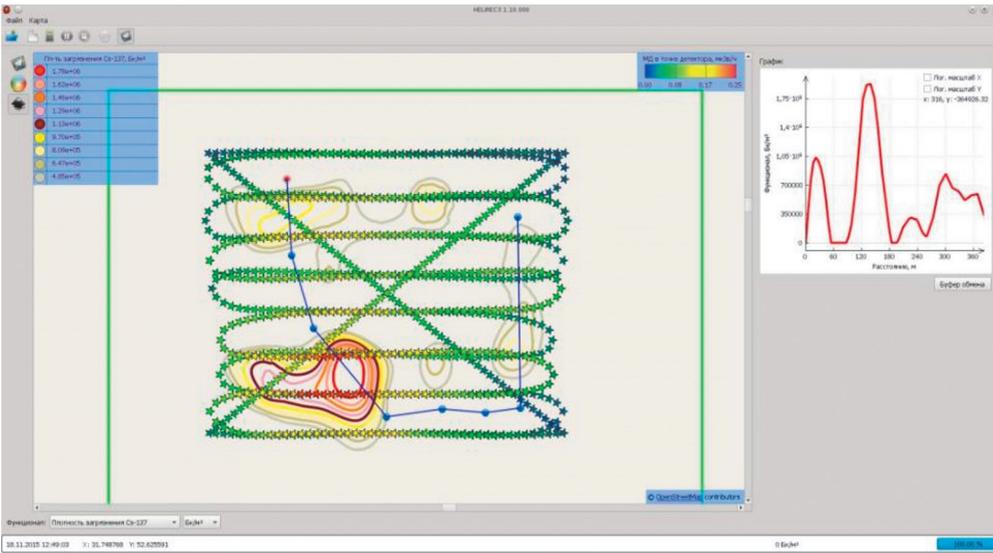


Рис.11. Внешний вид основного рабочего окна программного обеспечения восстановления пространственного распределения плотности поверхностного загрязнения радионуклидами.

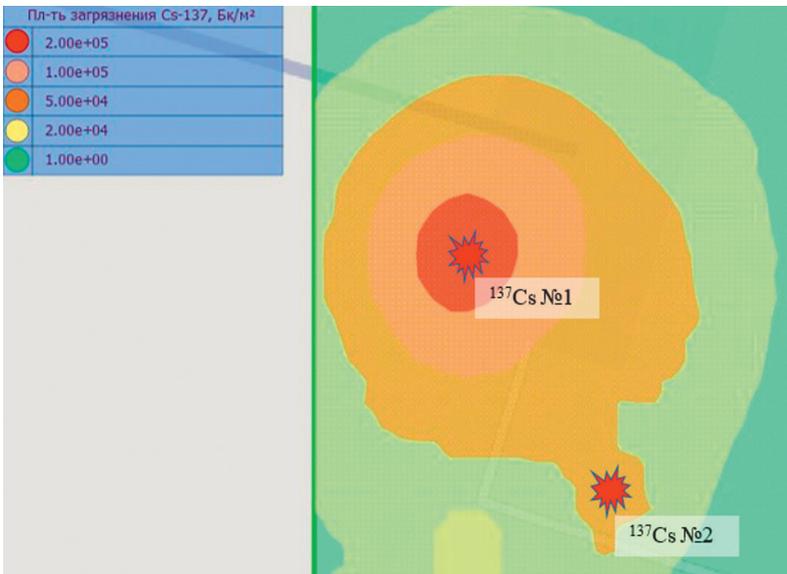


Рис.12. Результат работы программы Helirec по расчету плотности поверхностного загрязнения ^{137}Cs .

Обработка данных АГСК в режиме online осуществляется с помощью программы ARMS и включает в себя отображение данных измерений с их координатной привязкой на карте в виде разноокрашенных точек в зависимости от результатов измерений счета в выбранном энергетическом окне, либо мощности дозы, и определение мощности дозы на 1 м от подстилающей поверхности на основе поступающих данных измерений. Предусмотрена возможность сохранения полученных данных в базу

полетов для последующего анализа.

ARMS также позволяет выполнять работы с базой данных измерений, доступной после проведения полета, включая применение алгоритма поиска и оценки интенсивности излучения точечного источника, находящегося на подстилающей поверхности. Кроме того, ARMS предоставляет простой интерфейс доступа к полученным в ходе полета аппаратурным спектрам гамма-излучения в любой точке измерений.

Внешний вид рабочего окна программы ARMS с загруженными результатами измерений показан на рис.10.

Для решения задачи восстановления неравномерной плотности поверхностного загрязнения почвы радионуклидами разработана программа Helirec (рис.11.). Алгоритм оценки плотности загрязнения основан на методе регуляризации Тихонова с использованием данных об эффективности регистрации детектором гамма-излучения [5].

В процессе разработки АГСК определение параметров измерительного блока проводилось как экспериментальным, так и расчетным путем. Создана расчетная модель детектора NaI(Tl) Ø31×31 мм, входящего в состав измерительного блока УДКГ, используемая для определения функции отклика и энергетической зависимости эффективности регистрации гамма-излучения методом Монте-Карло [6].

В качестве иллюстрации работы программы Helires представлен результат (рис.12.) обработки данных натурального эксперимента, включающего в себя полет над двумя точечными источниками ионизирующего излучения ^{137}Cs (10^8 и 10^9 Бк), расположенными в углах квадрата со стороной 90 метров, на высотах от 50 до 100 метров.

Заключение

В ходе разработки в ИБРАЭ РАН измерительных комплексов для проведения аэрогаммасъемки за период с 2008 г. по настоящее время были созданы АГСК для работы с пилотируемыми и беспилотными летательными аппаратами. Измерительное оборудование и программное обеспечение постоянно модернизировались, учитывая возможности и особенности вновь появляющихся БПЛА, а также результаты проводимых испытаний. Последней разработкой стал АГСК, не привязанный к конкретному типу БПЛА, работающий автономно без необходимости подключения к системам БПЛА. Основными функциями, выполняемыми разработанными АГСК, на сегодняшний день являются: измерение характеристик радиационных полей в реальном масштабе времени; отображение результатов измерений с их координатной привязкой на картографической подложке; измерение

аппаратурных спектров гамма-излучения; оценка плотности поверхностного загрязнения подстилающей поверхности радионуклидами; локализация и определение интенсивности излучения точечного источника гамма-излучения; запись всех измерений в базу данных полета и доступ к этой информации с помощью интерфейса пользователя прикладного программного обеспечения.

Анализ потребностей организаций, эксплуатирующих такую аппаратуру, и нежелание привлекать специалистов в области дозиметрии и спектрометрии к эксплуатации приборов позволяет предположить дальнейшую эволюцию разработок в области аэрогаммасъемки по двум направлениям. Первое – это аналог УДКГ-А02, предоставляющий максимальные возможности по анализу, однако требующий определенной компетенции персонала, чтобы использовать все доступные возможности.

Другое направление – это прибор с минимально возможными массогабаритными характеристиками и уменьшенным функционалом, сосредоточенным преимущественно на измерениях мощности дозы гамма-излучения и представлении результатов измерений при минимальных действиях пользователя. В настоящее время в ИБРАЭ РАН совместно с НПП «Доза» ведутся работы по созданию такого миниатюрного измерительного прибора для использования с еще более широким кругом разновидностей БПЛА.

В будущем, в связи с дальнейшим развитием БПЛА в части миниатюризации, автоматизированности и повышения стабильности полетов, нами планируется использовать создаваемый миниатюрный измерительный прибор в формате «работа из коробки» без какой-либо адаптации прибора к БПЛА.

Литература

1. Бахур А.Е., Стародубов А.В. Перспективы использования БПЛА в радиоэкологии и при поисковых геологоразведочных работах // АНРИ. 2016. N 3(86). С. 11-18.
2. Алябьев А.В., Богатов С.А., Шведов А.М., Пугачев А.Н., Сидоров В.Т. Полетные испытания аэрогамма-спектрометрического комплекса для задач МЧС // АНРИ. 2011. N 4(67). С. 46-53.
3. Богатов С.А., Гаврилов С.Л., Ткаченко С.А., Шведов А.М., Алексеев А.В., Лизунов Е.М., Мазный Н.Г., Пугачев А.Н. Мобильное средство радиационной разведки на базе беспилотного летательного аппарата md4-1000 // Специальная техника. 2012. N 6. С. 16-22.
4. Богатов С.А., Гаврилов С.Л., Долгов В.Н., Пименов А.Е., Ткаченко С.А., Шведов А.М. Тестирование моделей интерпретации данных измерений для определения параметров радиоактивных загрязнений почвы на примере загрязнения территории Брянской области цезием-137 // АНРИ. 2014. N 3(78). С. 32-39.
5. Арон Д.В., Гаврилов С.Л., Киселев А.А., Шведов А.М. Восстановление плотности поверхностного загрязнения почвы радионуклидами по данным аэрогаммасъемки // Атомная энергия. 2019. Т. 126. N 6. С. 341-345.
6. Гаврилов С.Л., Киселев А.А., Пименов А.Е., Шведов А.М. Определение мощности дозы гамма-излучения с помощью детектора NaI(Tl) при измерениях методом аэрогаммасъемки // АНРИ. 2019. N 4(99). С. 18-26.

Experience of Using Unmanned Aerial Vehicles for Airborne Gamma-Spectrometric Survey of Territories

Gavrilov Sergei, Pimenov Artem, Shvedov Anton, Shickin Sergei, Yakovlev Vladislav (Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia), Martyniuk Yuri (SPC «Doza», Ltd, Zelenograd, Russia), Pugachev Aleksandr (Joint Stock Company Yu.K.Nedachin Scientific Production Center «ASPECT», Dubna, Russia)

Abstract. The paper focuses on the experience of using software and hardware for airborne gamma-spectrometric survey of radioactive contaminated areas using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). Historical development of the instrumentation park caused by rapid evolution of electronic components and optimization of radiation survey methods is demonstrated. A state-of-the-art commercially available aerial gamma survey device is described that is suitable for use with virtually any aircraft with a payload capacity over 0.9 kg. Further prospects for the development of airborne gamma-spectrometric survey are considered.

Key words: *airborne gamma-spectrometric survey, gamma-spectrum, radiation reconnaissance, dose rate, unmanned aerial vehicle (UAV).*

С.Л.Гаврилов (зав.отд.), А.Е.Пименов (с.н.с.), А.М.Шведов (н.с.), С.А.Шикин (нач.отд.), В.Ю.Яковлев (к.ф.-м.н., с.н.с.) – ИБРАЭ РАН, г. Москва.

Ю.Н.Мартынюк (к.ф.-м.н., гл.констр.) – НПП «Доза», г. Зеленоград.

А.Н.Пугачев (нач.отд.) – ЗАО «НППЦ «Аспект», г. Дубна.

Контакты: тел. +7 (495) 955-22-84; e-mail: artisl@ibrae.ac.ru.