

М. Ю. БЕЛЯЕВ, О. Н. ВОЛКОВ, О. Н. СОЛОМИНА, Г. М. ТЕРТИЦКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИЙ ЖИВОТНЫХ С ПОМОЩЬЮ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «ИКАРУС» В КОСМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ «УРАГАН» В РС МКС

Важнейшими задачами космонавтики являются контроль и исследование нашей планеты, которые осуществляются с помощью спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), функционирующих на околоземных орбитах. Они могут дать ценнейшую информацию для оценки экологической, эпидемиологической и иной ситуации на нашей планете, включая данные о миграции животных. В целях отработки методов слежения за перемещениями животных и птиц был организован совместный российско-немецкий проект на международной космической станции (МКС), представляющей собой идеальную лабораторию для испытаний на орбите аппаратуры и различных космических технологий.

В статье анализируется опыт эксплуатации в российском сегменте (РС) МКС системы контроля миграций животных, вобравшей в себя достижения современной космонавтики, спутниковой навигации, технологии управления и микроэлектроники. Кратко излагаются также научные результаты по изучению миграций животных и птиц, полученные в ходе реализации российской программы исследований.

Ключевые слова: международная космическая станция, космические эксперименты, научная аппаратура, исследование миграций животных.

Беляев Михаил Юрьевич. Доктор технических наук, профессор, начальник отдела, ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева (г. Королев, Московская обл.); заведующий кафедрой систем автоматического управления космического факультета, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Мытищи, Московская обл.). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Волков Олег Николаевич. Заместитель начальника отдела, ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева.

Соломина Ольга Николаевна. Член-корреспондент РАН, директор, Институт географии РАН (Москва).

Тертицкий Григорий Маркович. Кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт географии РАН. ORCID 0000-0002-4836-364X.

Статья по пленарному докладу на XXIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2022.

Введение

Фауна является одной из важнейших особенностей нашей планеты. Люди и животные живут в общей среде обитания. Поведение животных может служить показателем влияния человека на природу и изменений природных систем. По земному шару постоянно мигрируют миллиарды животных. Они соединяют самые отдаленные и труднодоступные регионы на Земле и могут быть своеобразными индикаторами для оценки благополучия нашей планеты.

Само существование животных, их жизнедеятельность, возникновение и исчезновение видов оказывают огромное влияние на природный мир в его нынешней форме. Учение В.И. Вернадского о биосфере основано в первую очередь на теории биогенной миграции [1], которая фиксирует глобальные перемещения животных и их стремление максимально заселить нашу планету [2]. Так будет и в дальнейшем. Воздействие людей на природу отражается в поведении животных. Причина этого в том, что все биологические виды занимают особые ниши, наиболее приспособленные для их существования. Если они теряют из-за деятельности людей часть этой ниши или всю ее, соответствующая популяция сокращается или вымирает либо меняет свое поведение и ищет новую среду обитания, что может служить ранним индикатором изменения окружающей среды, обусловленного человеческой деятельностью. Животные необходимы для нашего существования, но одновременно они играют все более значительную роль в качестве переносчиков болезней и возбудителей эпидемий. Около 70% мировых эпидемий, будь то атипичная пневмония, вирус Западного Нила или птичий грипп, представляют собой распространение инфекционных заболеваний, вызванное взаимодействием между дикими и сельскохозяйственными животными и людьми.

Следует отметить, что сам процесс миграции животных вызывает много вопросов. Например, мигрирующие птицы осуществляют длительные перелеты, в том числе над морями и океанами, что предполагает наличие у них способности к ориентированию и навигации, однако, каким образом это работает, пока не ясно.

Чтобы понять, как именно животное ориентируется в пространстве и определяет направление движения, необходимо найти ответы на фундаментальные вопросы: где находится животное в любой момент своей жизни? Каково его внутреннее состояние? Что оно делает в текущий момент времени? Что приводит к его смерти?

В отношении животных, обитающих в естественной среде, ни на один из этих фундаментальных вопросов пока нельзя ответить, если речь идет о средних и длительных отрезках времени, особенно это касается мелких представителей фауны, которые имеют наибольшее значение для нас, например, как распространители болезней (прежде всего летучие мыши).

В периоды глобальных изменений для человечества чрезвычайно важно установить и использовать биологические индикаторы изменения климата и окружающей среды. Дикие животные, которые обитают в широком спектре климатических зон по всему миру и мигрируют между ними, идеально для этого подходят.

В настоящее время спутниковые технологии глобального контроля и слежения за животными не задействованы в отношении около 75% птиц и млекопитающих вследствие их малых размеров. О больших перспективах использования миниатюрных спутниковых радиомаяков для изучения миграций птиц орнитологи писали еще

30 лет назад [3]. Многие важные с экологической и экономической точек зрения виды очень мелкие: например, летучие мыши, певчие птицы и перелетная саранча. Общее правило при изучении миграций животных заключается в том, что прикрепленные к ним устройства не должны превышать 3% от их массы тела, чтобы дополнительный вес не влиял на естественное поведение особи [4–6]. И сегодня весьма важная задача – создание системы глобального контроля перемещения мелких животных, которая откроет новую эру исследований их миграций [7].

МКС является удобной лабораторией для отработки систем отслеживания миграций животных прежде всего потому, что ее полет происходит на высоте около 400 км, в то время как другие искусственные спутники Земли имеют обычно большую высоту орбиты. Кроме того, наличие экипажа на борту МКС позволяет монтировать на ее внешней поверхности конструкции и антенны больших размеров, благодаря чему можно уменьшить размеры приемопередатчиков на Земле. Важно также, что российские специалисты разработали уникальную технологию проведения экспериментов на орбитальных станциях и накопили значительный опыт их успешного осуществления [8, 9]. В российском сегменте (РС) МКС данный опыт и технология используются, например, в эксперименте «Ураган», цель которого – отработка аппаратуры и технологий изучения Земли и оценки развития потенциально опасных и катастрофических явлений [10].

В 2009 г. по инициативе Института изучения поведения животных Общества Макса Планка (Max Planck Institute of Animal Behavior – MPIAB, Германия) в рамках программы международного сотрудничества ICARUS под руководством профессора М. Викальски (М. Wikelski), энтузиаста и ведущего мирового специалиста в области изучения миграций животных, началась разработка системы слежения за мелкими животными. Научный руководитель космического эксперимента «Ураган» профессор М.Ю. Беляев предложил отработать такую технологию и систему в РС МКС [4, 5]. Основанием для этого послужило совпадение задач, решаемых в рамках обоих направлений исследований, а также имеющиеся возможности испытать новые технологии и научную аппаратуру на российских орбитальных станциях [11, 12]. В результате в ноябре 2014 г. было подписано соглашение между космическими агентствами двух стран, позволившее приступить к проекту и создать научную аппаратуру (НА) «Икарус», которая была доставлена на борт РС МКС [5, 6].

«Икарус» представляет собой систему, состоящую из бортового и наземного сегментов. В бортовой входят управляющий компьютер OBC-I (OnBoard Computer Icarus) и антенный блок, обеспечивающий выдачу управляющих данных закрепляемым на животных датчикам (тегам), а также сбор данных с тегов о координатах перемещения животных при их сезонной миграции. Функционирование бортового сегмента «Икарус» обеспечивалось с помощью получаемых данных и систем РС МКС [13]. В соответствии с подписанным соглашением за антенный блок и управляющий компьютер отвечает немецкое космическое агентство DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt).

Следует отметить, что успеху данного проекта способствовало плодотворное сотрудничество немецких и российских специалистов. Например, российские специалисты, используя большой опыт проектирования бортовых антенн, предложили эффективную схему и конструкцию бортовых антенн оборудования «Икарус», которая была реализована в РС МКС [5, 6, 14]. К созданию и производству управляющего

компьютера ОВС-1 была привлечена фирма «Элкус» (г. Санкт-Петербург), разработавшая ранее на начальной стадии развертывания МКС в немецком эксперименте «Rokviss» компьютер ОВС. При этом была обеспечена удобная интеграция ОВС с бортовыми системами РС МКС за счет создания специального блока питания и необходимых управляющих и информационных интерфейсов. Управляющий компьютер ОВС успешно отработал в эксперименте Rokviss и затем длительное время использовался в совместных российско-немецких экспериментах «Контур», «Контур-2» [15]. Положительный опыт сотрудничества немецких и российских специалистов, полученный в ходе экспериментов с аппаратурой Rokviss, позволил немецкой фирме STI, ответственной за аппаратуру «Икарус», привлечь «Элкус» и к созданию ОВС-I. Программное обеспечение для ОВС-I разрабатывала STI.

Наземная часть аппаратуры «Икарус» содержит ряд тегов, которые крепятся на мигрирующих животных, а также специальные комплексы управления и обработки данных [4–6]. Миниатюрный тег дает возможность связываться с бортовым оборудованием «Икарус» на расстоянии до 600 км. При этом масса тега составляет менее 5 г. В теге применяется интегральная схема специального назначения (application specific integrated circuit – ASIC), выполняющая основные функции передатчика. ASIC оптимизирована под низкое энергопотребление: основными потребителями энергии являются системы радиочастотной связи и навигационная. В теге используется мультисистемный навигационный модуль EVA-M8M производства швейцарской компании U-blox, который обладает высокой производительностью и чувствительностью и поддерживает такие спутниковые навигационные системы, как GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou. Микросхема расположена в корпусе типа QFN, имеющем планарные выводы, размещенные непосредственно под микросхемой по всем четырем сторонам. Габариты модуля составляют 7×7×1,1 мм. Тег получает от РС МКС информацию об орбите и ориентации станции и способен рассчитать данные о возможных сеансах связи с МКС. В расчетный момент времени тег с помощью спутниковой навигационной системы определяет свое местоположение и передает эту информацию в РС МКС вместе с данными ускорений, давления и температуры, а также магнитометра, входящего в состав тега. Принятая на станции информация передается в московский центр управления ЦУП-М, где она предварительно анализируется и затем выдается участникам исследований [4–6]. Срок службы тега – не менее 9 месяцев.

Тестовые проверки системы выполнялись с марта 2020 г., а в сентябре 2020 г. был начат этап опытной эксплуатации системы, который успешно закончился в 2021 г. ее переходом на режим отслеживания миграции животных. За это время были выполнены десятки интересных исследований. Например, по научным программам российских ученых изучались миграции черных дроздов, кукушек, сов, сайгаков, кабанов и многих других видов млекопитающих и птиц. Кроме того, теги были установлены на склонах Кавказа для оценки возможности контроля опасных сходов оползней [16, 17].

Проведение тестов после доставки аппаратуры на борт РС МКС

С 10.03.2020 по 14.09.2020 российские и немецкие специалисты тестировали аппаратуру «Икарус» в соответствии с утвержденной обеими сторонами программой испытаний.

При этом решались следующие задачи:

- проверялась работоспособность антенного блока «Икарус» после его монтажа на внешней поверхности служебного модуля (СМ) РС МКС;
- проверялось электрическое и информационно-логическое взаимодействие между ОВС-I и бортовыми системами РС МКС, антенным блоком «Икарус» и наземным оборудованием.

Программа испытаний предусматривала пять тестов. С 10.03.2020 по 05.04.2020 в автоматическом режиме проводился тест №1, в рамках которого выполнялся мониторинг состояния аппаратуры «Икарус» и полученные измерения сравнивались с результатами наземных испытаний.

Тест №1 был разделен на две части, которые проводились параллельно. Во время первой осуществлялись регистрация и анализ уровней фоновых радиопомех в различных районах Земли, воспринимаемых приемником «Икарус» на МКС, и выполнялась его точная регулировка. В ходе второй части испытания проверялся энергетический баланс тракта МКС–Земля при разных уровнях мощности передатчика (3,2 Вт, 4 Вт, 5 Вт). Для приема и передачи сигнала были подготовлены антенны, установленные на крыше фирмы STI, базирующейся в г. Имменштааде (Immenstaad, Германия), см. рис. 1.



Рис. 1. Пример антенны для приема и передачи информации с МКС и на МКС во время теста №1

При проведении тестов компьютер ОВС-I получал от бортовых систем РС МКС:

- баллистические данные по орбите МКС;
- данные по ориентации МКС;
- бортовое время и синхроимпульс (PPS) МКС;
- двухстрочный набор элементов (TLE) орбиты в формате НОРАД–НАСА, широко используемом для представления в интернете баллистической информации об объектах, находящихся на околоземных орбитах [18].

Для получения указанной информации использовались также измерения автономной системы навигации РС МКС [19].

В результате оказалось, что все данные по бортовым системам, относящиеся к работоспособности аппаратуры «Икарус», были в пределах ожидаемых значений. В частности, значения температуры, напряжения и тока соответствовали тем, которые наблюдались во время наземных испытаний. Небольшие сбои в работе оперативно корректировались выдачей команд с Земли. Бортовое оборудование «Икарус» было признано исправным и полностью работоспособным с заданными техническими характеристиками.

В процессе выполнения теста был успешно записан фоновый радишум Земли в диапазоне рабочих частот приемника «Икарус» 468,065–468,135 МГц при различных уровнях настроек затухания в трактах приемных антенн каналов А, В и С, в результате чего были построены глобальные карты по радиопомехам (рис. 2). Зеленым цветом на рис. 2 обозначен низкий уровень радишума, желтым – повышенный, красным – высокий. Наилучшей оказалась локальная частота генератора PLL (Phase-Locked Loop) PLL1 388,75 МГц.

По результатам теста было установлено, что оптимальным образом аппаратура «Икарус» работает при использовании внутренних настроек затухания в трактах антенн приемника в канале $A - 10,5$ дБ, в канале $B - 12$ дБ, в канале $C - 10,5$ дБ.

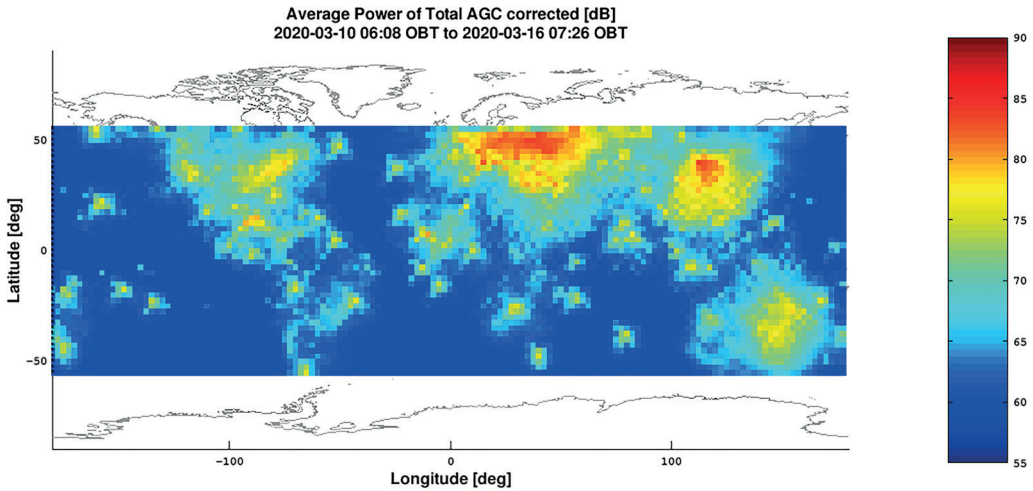


Рис. 2. Уровни фонового шума Земли (частота PLL 388,75 МГц), ослабление в канале $A - 12$ дБ, в канале $B - 12$ дБ, в канале $C - 11,5$ дБ

Сигнал с НА «Икарус», передаваемый на Землю, был проанализирован специалистами, которые установили, что он распространяется с хорошим качеством, его искажения не наблюдалось.

По результатам теста несущая частота канала передачи была уменьшена на 1500 Гц, а в качестве оптимального был выбран уровень мощности передатчика 3,2 Вт.

Во время теста №2, проводившегося в автоматическом режиме с 07.04.2020 по 29.04.2020, проверялась передача сигнала с Земли на борт (Uplink Pattern Test) посредством тестовых антенн, установленных на крыше здания STI, и имитатора тега (Tag Simulator), размещенного внутри него. Цель теста состояла в получении диаграмм направленности приемных антенн «Икарус» на РС МКС с уточнением направления основных лучей и ширины лучей приемных антенн, а также в анализе радиочастотного спектра сигнала относительно частоты приема ($402,25 \pm 4,5$ МГц) (рис. 3).

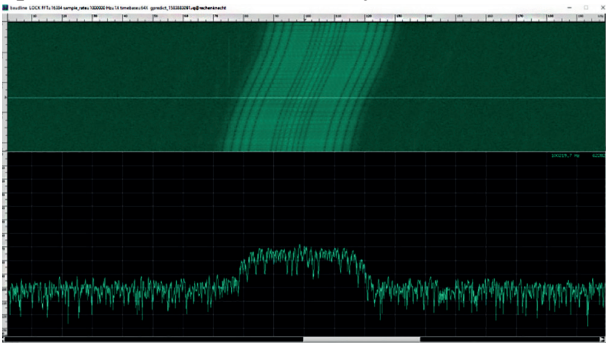


Рис. 3. Записанный спектр сигнала при прохождении МКС над наземной станцией в STI

Имитатор тега представлял собой переносной компьютер с подключенным к нему GPS-приемником с антенной. Компьютер был также подсоединен к тестовым антеннам для генерирования радиочастотного сигнала, необходимого при испытаниях бортового приемника «Икарус». Передаваемые на борт сигналы были предварительно специально рассчитаны для каждого испытания и записаны в память компьютера в соответствии с заранее определенными сценариями.

В ходе теста №2 планировалось провести двенадцать сеансов при пролете МКС над наземным пунктом г. Имменштаада для уточнения диаграммы направленности четырех каналов связи, трех приемных каналов «Земля–борт» для приема сигналов с Земли в РС МКС и одного канала для передачи данных с РС МКС на Землю.

Планировалось провести измерения во время четырех прохождений МКС для каждого из каналов приема (левого, правого, центрального). С приемной антенны по трем высокочастотным кабелям принимаемый сигнал поступал в компьютер ОВС-I и далее по российскому каналу передачи информации передавался сначала в ЦУП-М, а затем в STI.

На рис. 4 расчетные диаграммы направленности приемных антенн обозначены синим цветом, а диаграмма, соответствующая максимальной передаче данных с борта, – зеленым.

Для передачи сигнала с Земли на борт РС МКС использовался заранее сформированный тестовый сигнал с шириной полосы 2 МГц. Центр его спектра находился на частоте 402,25 МГц. Сигнал передавался с помощью имитатора тега, усилителя мощности и системы слежения за МКС. Вычисленная эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) канала «Земля–борт» составила 36,1 дБмВт.

Во время теста №2 реально было проведено тринадцать сеансов при пролете МКС над наземным пунктом г. Имменштаада. Для каждого сеанса специалисты STI готовили команду активации сброса необработанных данных (raw data dump, 2 Гб) после проведения сеанса связи.

Полученные по каналу «Земля–борт» данные сравнивались с результатами моделирования и испытаний на Земле. Было установлено их соответствие.

Записанная диаграмма направленности канала «Земля–борт» использовалась для определения фактического местоположения временного окна приема и сравнения его с прогнозируемым временем. Допуски в расположении окна приема были обусловлены в первую очередь погрешностями определения ориентации МКС и времени. Было установлено, что фактическое местоположение окна приема появляется на 2-3 секунды позже по направлению полета относительно прогнозируемого. Это не выходило за пределы ожидаемого допуска и не влияло на передачу данных с тега. По результатам теста №2 откорректировано время связи с МКС таким образом, чтобы прием сигнала от тега на борту МКС осуществлялся при его максимальной мощности.

Во время теста №2 было обнаружено влияние средств стыковки/расстыковки американского сегмента (АС) МКС и внекорабельной деятельности АС на работу приемника НА «Икарус» – они создавали помехи при приеме информации по каналу «Земля–борт». По этой причине на время работы средств стыковки/расстыковки АС МКС аппаратура «Икарус» переводилась из штатного режима «включено» в режим «обогрев».

С 26.05.2020 по 26.06.2020 в автоматическом режиме одновременно проводились тесты №3 и №4. Первый из них выполнялся с использованием имитатора тегов STI, а второй – с тестовым тегом (Test Tag). Вид тестового тега представлен на рис. 5.

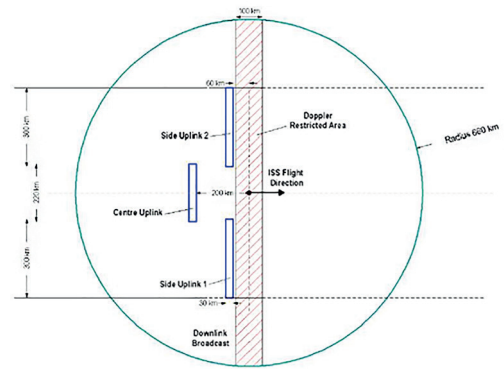


Рис. 4. Расчетные диаграммы направленности приемных и передающей антенн аппаратуры «Икарус»



Рис. 5. Тестовый тег (Test Tag)

Тестовый тег не был прототипом реального тега, который планировали устанавливать на птицах и животных, но содержал аналогичное программное обеспечение для связи и имел стандартные интерфейсы, чтобы им можно было управлять при помощи переносного компьютера и подключать его к антеннам различных типов.

Были смоделированы разнообразные сценарии передачи данных, в которых варьировались временные интервалы передачи пакетов данных

и мощности сигнала. В результате определены характеристики системы, обеспечивающие устойчивость приема и передачи информации.

С 13.07.2020 по 14.09.2020 проводился тест №5 в автоматическом режиме. В рамках этого теста выполнялась проверка функционирования НА «Икарус» с прототипами тегов, размещенными в условиях, приближенных к реальным. Координаты тегов были известны, что позволяло оценить навигационную точность системы, которая оказалась близка точности GPS и ГЛОНАСС. В ходе теста российские специалисты использовали десять прототипов тегов, в том числе с небольшими изменениями программного обеспечения.

По результатам теста №5 сделаны следующие основные выводы:

- все прототипы тегов имели связь с НА «Икарус» в РС МКС. Навигационные данные и вся информация от тегов по телеметрическому каналу РС МКС поступала в московский ЦУП-М и затем передавалась участникам эксперимента;
- НА «Икарус» во время теста №5 не получала никаких других сигналов кроме поступающих от прототипов тегов;
- расположение тега оказывало значительное влияние на состояние заряда его батареи и вероятность контакта с МКС. Батарея тегов, расположенных в лесу или под деревом, полностью разряжалась через определенное время, а в местах хорошего солнечного освещения сохраняла нормальный уровень заряда.

Результаты теста №5 были учтены на этапе эксплуатации.

Таким образом, бортовая аппаратура и теги «Икарус» были успешно введены в эксплуатацию в период с 10 марта по 14 сентября 2020 года при участии РКК «Энергия», STI и INRADIOS (Дрезден, Германия), а также МРІАВ и Института географии РАН. Было установлено, что НА «Икарус» на борту МКС, а также прототипы тегов функционируют в соответствии с технической документацией.

Некоторые результаты исследования миграций животных

Успешно выполненные тесты позволили начать глобальное изучение миграций животных и птиц. Проекты, организованные на первом этапе научных исследований российскими учеными, приведены в таблице.

В 2021 г. исследования миграций птиц с помощью информации от НА «Икарус» РС МКС по российской программе исследований преследовали три основные цели:

- изучение пролетных путей, миграционных остановок и районов зимовки редких видов, внесенных в региональные и федеральную Красные книги (сапсан, степной большой кроншнеп, азиатский бекасовидный веретенник, дупель);
- выявление видов птиц – потенциальных распространителей птичьего гриппа и других эпизоотий в азиатской части России (большая горлица, кулики, хищные птицы);
- изучение влияния природных (изменение климата, погода, географические барьеры) и антропогенных (трансформация ландшафтов человеком) факторов на фенологию миграций, изменения пролетных путей и мест зимовки, а также расселения птиц в XXI веке (черный дрозд, полярная крачка, хищные птицы, кукушки).

Т а б л и ц а

Проекты российских ученых

Объект исследования	Организация / Участник	Район исследования
Полярная крачка (<i>Sterna paradisaea</i>)	Керженский заповедник, Кенозерский нацпарк	Архангельская обл.
Дупель (<i>Gallinago media</i>)	Институт проблем экологии и эволюции РАН	Московская обл.
Степной большой кроншнеп (<i>Numenius arquata suschkini</i>)	ВНИИ «Экология»	Саратовская обл, Оренбургская обл.
Черный дрозд (<i>Turdus merula</i>)	Институт экологии растений и животных РАН, Институт географии РАН	Московская обл., Курская обл.
Обыкновенная кукушка (<i>Cuculus canorus</i>), глухая кукушка (<i>Cuculus optatus</i>)	Зоологический институт РАН, Институт биологических проблем Севера РАН, Институт биологии КарНЦ РАН, Байкальский запо- ведник, Хинганский заповедник, Институт проблем экологии и эволюции РАН	Томская обл., Сахалинская обл., Республика Бурятия, Амурская обл., Красноярский край
Серая цапля (<i>Ardea cinerea</i>), восточный болотный лунь (<i>Circus spilonotus</i>), малый пе- репелятник (<i>Accipiter gularis</i>)	Иркутский государственный университет	Иркутская обл.
Сапсан (<i>Falco peregrinus</i>)	Институт экологии растений и животных РАН	Ямало-Ненецкий АО, Ненецкий АО
Малый перепелятник (<i>Accipiter gularis</i>), лесной дупель (<i>Gallinago megala</i>), большая горлица (<i>Streptopelia orientalis</i>), пестрый дрозд (<i>Zoothera dauma</i>)	Зоологический институт РАН, Байкальский заповедник	Республика Бурятия
Азиатский бекасовидный веретенник (<i>Limnodromus semipalmatus</i>)	Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН	Республика Саха (Якутия)
Кряква (<i>Anas platyrhynchos</i>)	Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН	Республика Саха (Якутия)

Зимняк (<i>Buteo lagopus</i>)	Институт экологии растений и животных РАН, Институт биологических проблем Севера РАН	Ненецкий АО, Чукотский АО
Ушастая сова (<i>Asio otus</i>)	Московский педагогический госуниверситет	Московская обл.
Речная крачка (<i>Sterna hirundo</i>), травник (<i>Tringa totanus</i>)	Кенозерский нацпарк, Институт географии РАН	Архангельская обл.
Большой песочник (<i>Calidris tenuirostris</i>)	Институт биологических проблем Севера РАН, ВНИИ «Экология»	Камчатский край
Малый суслик (<i>Spermophilus pygmaeus</i>), перевязка (<i>Vormela peregusna</i>)	Ставропольский противочумный институт	Республика Дагестан
Сайгак (<i>Saiga tatarica</i>)	Институт проблем экологии и эволюции РАН	Астраханская обл., Республика Калмыкия

Изучение редких видов

Степной большой кроншнеп – обособленный узкоареальный подвид широко распространенного большого кроншнепа, его ареал обитания и численность сокращаются в последние 20 лет. Места гнездования этого подвида сегодня известны в самых общих чертах, границы его распространения не установлены, информация о районах зимовок весьма скудная, а зоны миграционных остановок неизвестны. Численность низкая и продолжает сокращаться повсеместно в районах размножения. Причины этого не установлены: лежат ли они в районах гнездования, на трассах пролета или на местах зимовок – неясно. Существует реальная угроза исчезновения этих птиц, если не предпринять эффективных мер по их сохранению. Подвид внесен в Красную книгу РФ. В мае 2021 г. в Саратовской и Оренбургской областях были помечены тегами «Икарус» три особи степного большого кроншнепа. С помощью навигационных данных, переданных с РС МКС, получена информация о сроках их предмиграционных кочевок и миграции, миграционных трассах, местоположении миграционных остановок и их длительности, районах зимовок и конкретной локализации птиц в местообитаниях. Информация, полученная всего для трех особей, показала, что пути миграции и районы зимовок оказались совершенно различными и ранее неизвестными (рис. 6) [20]. Была выявлена важная миграционная остановка на озерах Кумо-Манычской впадины на юге Калмыкии, где кроншнепы держались 2-3 недели и откуда их дальнейшие пролетные пути разошлись к Черному и Каспийскому морям. Полученные данные позволили закрыть существенные пробелы в знаниях об этой редкой птице и обратить внимание природоохранных органов Калмыкии на район миграционной остановки, они использованы также в последней версии Красной книги Российской Федерации [20].

Сапсан – один из самых распространенных видов хищных птиц, его нет только в Новой Зеландии и Антарктиде. В то же время места его обитания распределены неравномерно по ареалу, а численность в большинстве районов очень низкая. Местами он вообще исчез на гнездовье, что послужило основанием занести его в Международную красную книгу и Красную книгу России [20]. Мечение молодых сапсанов проводили в июле–августе 2021 г. в Ненецком и Ямало-Ненецком автоном-

ных округах. Оба района находились значительно севернее зоны приема сигнала те-гов, поэтому первые данные были получены через 2-2,5 месяца в более южных широтах. Информация от НА «Икарус» РС МКС позволила определить точные сроки и пути миграции птиц из районов размножения на места зимовок, локализовать места их остановки на путях миграции, кроме того, она пригодна для изучения размеров территорий, которые занимают птицы в разные периоды размножения в зависимости от типов местообитаний и сезонного распределения видов объектов их охоты.

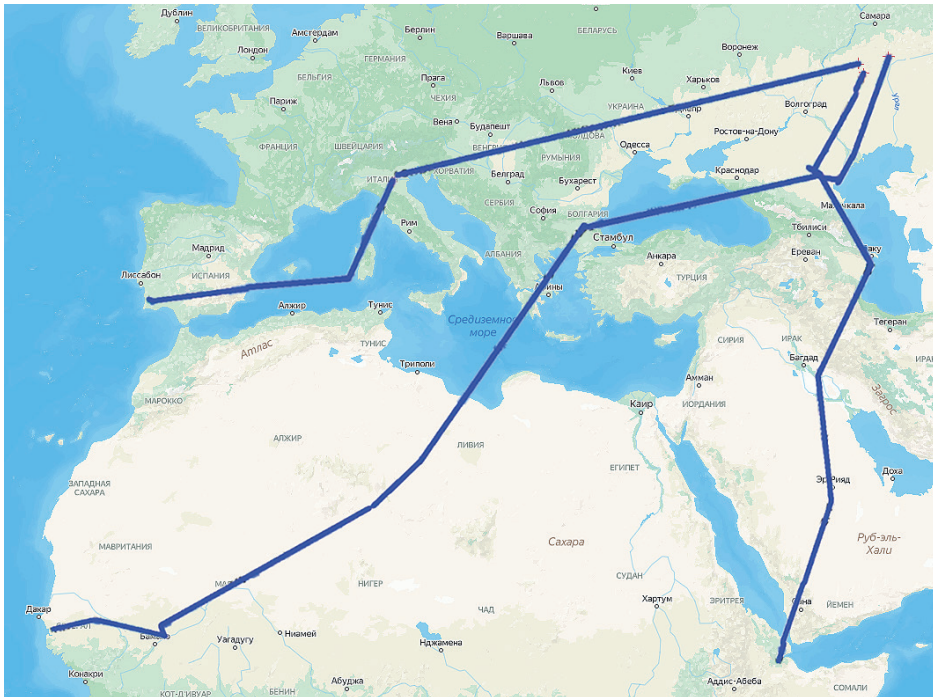


Рис. 6. Осенние пути миграции степного большого кроншнепа, выявленные с помощью навигационной информации НА «Икарус» РС МКС

Азиатский бекасовидный веретенник – редкий вид, занесенный в Красную книгу России. Численность оценивается в 23 тыс. особей. Гнездится в лесостепной и степной зонах Азии и имеет фрагментированный и динамичный ареал обитания. На территории Якутии начал гнездиться с 2019 г. [21]. До сих пор неизвестны пути пролета и районы зимовки якутской популяции этого редкого вида. Анализ навигационных данных, полученных о миграциях шести птиц, показал, что траектория осеннего пролета проходит через Восточную Монголию и северо-западные районы Китая к побережью Желтого моря. Птицы находились в Китае около месяца и затем направились в разные районы на зимовку – во Вьетнам, Таиланд и Индонезию (рис. 7) [22].

Индивидуальные данные о перемещениях птиц позволят разработать стратегию охраны и обнаружить наиболее важные районы обитания бекасовидного веретенника на территории России и за рубежом.

Дупель до середины XIX в. был обычным и даже многочисленным видом в Подмоскowie, но в течение XX в. численность его катастрофически сократилась, в основном из-за уничтожения исконных мест его гнездования – осушения и уничтожения болот, распашки лугов и т.п. В итоге с 1998 г. гнездовая популяция этого кулика

в Московской области внесена в региональную Красную книгу. В 2021 г. с помощью навигационной информации выявлены пути перелета дупелей на места зимовок и возможные угрозы, возникающие во время их миграции. Восемь из десяти окольцованных в этом сезоне в гнездовых районах северного Подмоскья дупелей улетели на зимовку в Африку. Зафиксирована гибель половины помеченных птиц во время миграций над пустынными районами, четыре погибли во время перелета над Сахарой в Египте, на юге Чада и в Судане. В начале марта 2022 г. четыре птицы оставались в Замбии и Конго [23], а в мае по крайней мере одна вернулась в район мечения на тот же участок, где была поймана в 2021 г. Данные о путях миграции дупелей к местам зимовок переданы для включения в Евразийско-Африканский онлайн-атлас миграций птиц (The Eurasian African Bird Migration Atlas).

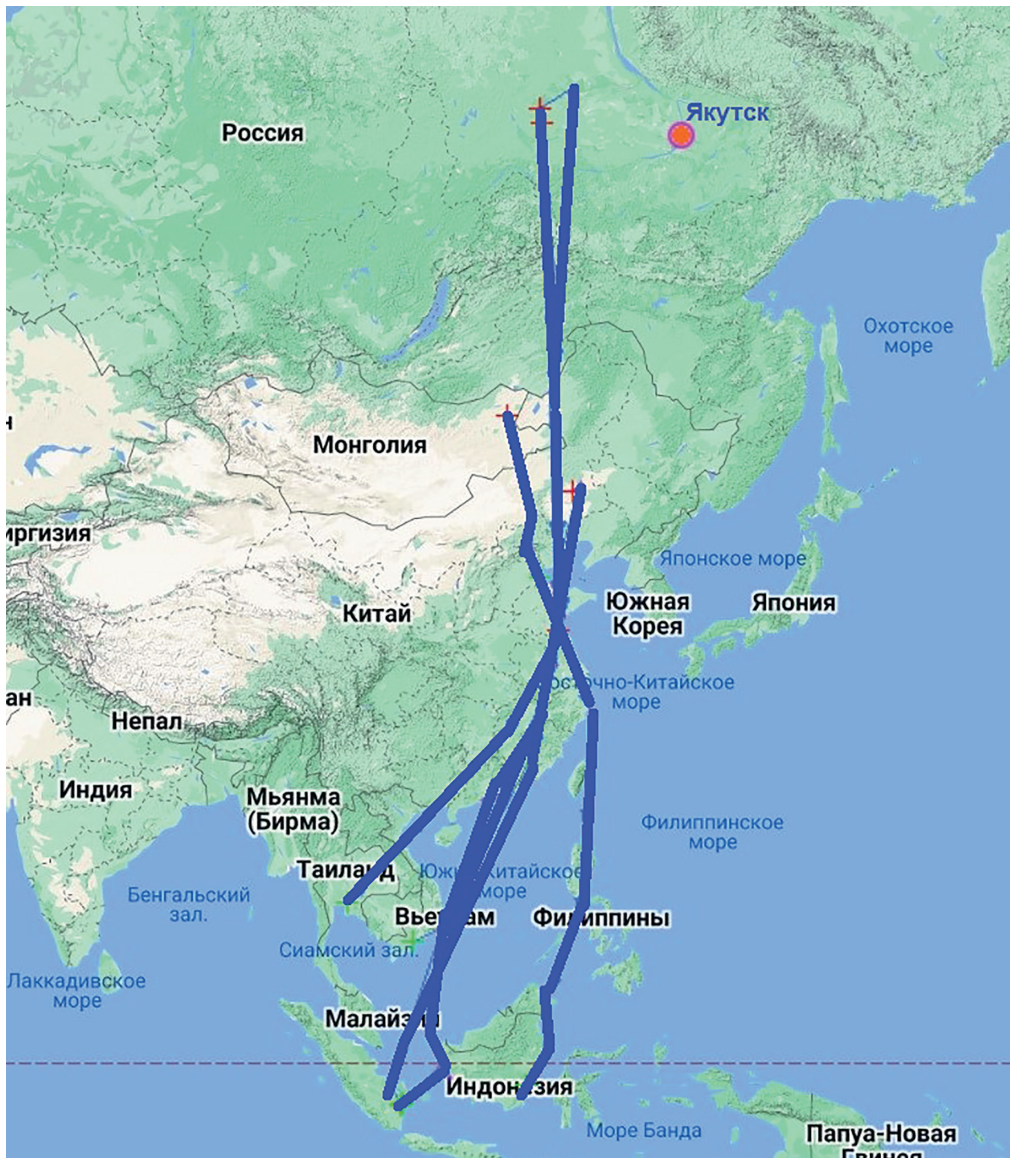


Рис. 7. Миграционные пути на зимовки азиатского бекасовидного веретеника, выявленные по навигационным данным НА «Икарус» РС МКС

Изучение путей распространения инфекций

Миграции птиц через горы и пустыни Восточной Азии до сих пор остаются слабо изученными. Использование навигационной информации от НА «Икарус» РС МКС позволило получить данные о маршрутах и сроках для нескольких видов птиц – дальних мигрантов, летящих из Восточной Сибири на зимовки в Юго-Восточную Азию и Австралию. Анализ миграционной стратегии малого перепелятника, лесного дупеля, азиатского бекаса и большой горлицы, помеченных тегами в Забайкалье [24, 25], показал, что перенос высокопатогенных штаммов гриппа этими птицами из Юго-Восточной Азии в Сибирь маловероятен, поскольку острая фаза заболевания несовместима с миграционными бросками на сотни километров, зафиксированными для этих видов по информации от НА «Икарус».

Влияние природных и антропогенных факторов на миграции птиц

Изучение миграций полярных крачек на основе информации, полученной по результатам кольцевания птиц, ставит целью выяснить с помощью самых современных технологий детали пролетных путей и особенности их экологии. Район полевых работ находился на Онежском полуострове Белого моря на широте $65,15^\circ$, т.е. значительно севернее зоны связи с МКС. Птицы были помечены тегами «Икарус» в начале гнездового сезона, поэтому первая связь с МКС установилась во второй половине августа, в это время птицы уже мигрировали на юг и находились в центре Северной Атлантики. Были получены новые данные о миграционных путях этого вида: после гнездования на побережье Белого моря вопреки всем предположениям крачки не полетели на юг к местам зимовок в Антарктике, а 2-3 недели обитали к северу от места размножения – у кромки льдов в Гренландском и Баренцевом морях (рис. 8) [25].

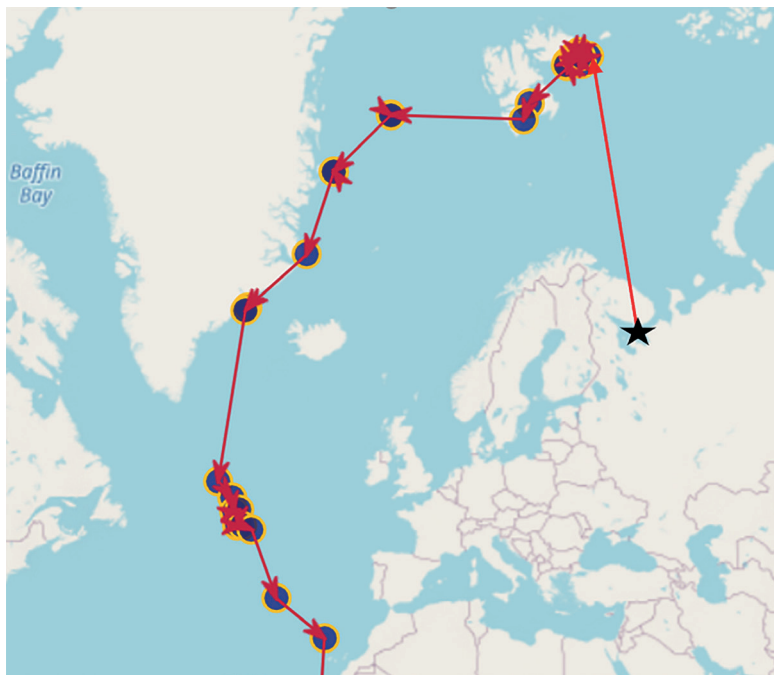


Рис. 8. Миграционный путь полярной крачки в Северном полушарии

Такое необычное направление первой части миграции, скорее всего, вызвано дефицитом корма в районе гнездования. Перед длительным перелетом в Южное полушарие, особенно через бедные тропические воды Атлантики, крачки должны накопить необходимые запасы жира, поэтому до миграции в Антарктиду летят более тысячи километров на север, в богатые воды у кромки многолетних льдов и шельфовых ледников. Дальнейшее потепление в Арктике приведет к исчезновению многолетних морских льдов и большей части шельфовых ледников и обеднению прилегающих вод. Можно предположить, что это негативно скажется на морских птицах, в том числе на популяции полярной крачки, гнездящихся не только в арктических широтах, но и за полторы тысячи километров южнее от этих районов.

Заключение

Проведенные тесты и полученные результаты исследований миграций животных и птиц с помощью НА «Икарус» подтвердили эффективность созданной в РС МКС системы контроля их миграций. В процессе создания и эксплуатации системы продемонстрированы возможности использования РС МКС в качестве орбитальной научной лаборатории для отработки новых технологий, что является одной из целей эксперимента «Ураган». Использование глобальной системы контроля за перемещением объектов позволяет решать важные научные и прикладные задачи. Большие возможности во время исследований миграций животных и птиц дает одновременное использование всего комплекса НА эксперимента «Ураган» в РС МКС [10].

Данные о миграциях животных – это не просто описание путей перемещения птиц и млекопитающих, а уникальная информация о взаимодействии их с окружающей средой [26, 27]. Таким образом, с помощью НА эксперимента «Ураган» возможно не только контролировать перемещение изучаемых объектов, но и попытаться выяснить причины, приводящие к изменению маршрутов их миграций и смене мест зимовок. Созданная система позволит также продвинуться в выяснении природы и механизма ориентирования и навигации мигрирующих птиц [28, 29, 30].

С помощью навигационной информации НА «Икарус» РС МКС выявлены наиболее важные районы миграционных остановок и новые места зимовок редких видов птиц и подготовлены рекомендации к стратегии их охраны. Новые данные о миграции дальневосточных птиц позволили определить виды потенциальных переносчиков особо опасных природных инфекций. Получена информация о необычных миграционных маршрутах арктических птиц и возможном влиянии на них антропогенной деятельности и глобального потепления.

Данная технология может применяться и для прогнозирования опасных и катастрофических событий, таких как землетрясения, распространение различных заболеваний и т.д. [6, 31]. Она будет также полезной для контроля опасных сходов ледников, оползней и т.п. по программе эксперимента «Ураган», выполняемого в РС МКС [16, 17].

*Г.М. Тертицкий выполнял исследования по теме госзадания ИГ РАН
(номер ЦИТИС АААА-АААА-А19-119022190168-8).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2004. 575 с.
2. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука. 1987. 339 с.
3. Nowak, E., Berthold, P., Satellite Tracking: a New Method in Orientation Research, *Orientation in Birds*, Experientia Supplementum, 1991, vol. 60. pp. 307–321.
4. Беляев М.Ю., Викельски М., Лампен М., Легостаев В.П., Мюллер У., Науманн В., Тертицкий Г.М., Юрина О.А. Технология изучения перемещения животных и птиц на Земле с помощью аппаратуры ICARUS на российском сегменте МКС // Космическая техника и технологии. 2015. №3. 2015. С.38–51.
5. Беляев М.Ю., Вепплер Й., Викельски М., Волков О.Н., Мюллер У., Питц В., Соломина О.Н., Тертицкий Г.М. Отработка технологии контроля перемещения животных на Земле с помощью научной аппаратуры, установленной на РС МКС // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»». 2020. С. 9–17.
6. Weppler, J., Belyaev, M.Y., Pitz, W., Wikelski, M., Tertiski, G., Savinkov, V., Driebe, T., First Results from the German-Russian ICARUS System for Animal Tracking from ISS, *72nd International Astronautical Congress (IAC)*, Dubai, United Arab Emirates, 25–29 October 2021.
7. Томкович П.С. Новая эра в изучении перелетов куликов Северной Евразии // Вопросы экологии, миграции охраны куликов Северной Евразии (Материалы 10-й юбилейной конференции рабочей группы по куликам Северной Евразии). Иваново, 2016. С. 377–385.
8. Беляев М.Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях // Машиностроение. 1984. 264 с.
9. Беляев М.Ю. От ракеты Р-7 и первого полета человека в космос до постоянной пилотируемой орбитальной станции // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. №3 (114). С. 96–121.
10. Беляев М.Ю. Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107.
11. Микрин Е.А., Беляев М.Ю. Отработка на МКС новых методов управления и аппаратуры для совершенствования космической техники и проведения экспериментов // Материалы конференции «Управление в аэрокосмических системах» (УАС-2018). 11-я Российская мультиконференция по проблемам управления. 2018. С. 9–18.
12. Беляев М.Ю. Проблемы управления при проведении экспериментов на Международной космической станции // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018). Сборник трудов VI Международной научной конференции, посвященной 85-летию Ю.А. Гагарина. 2019. С. 7–16.
13. Беляев М.Ю., Харчиков М.А., Воронин Ф.А. Контроль перемещения животных на Земле с помощью научной аппаратуры, установленной на российском сегменте Международной космической станции // Лесной вестник. 2019. № 4. Т. 23. С.49–56.
14. Васильев К.В., Дробышев А.И. Оптимизация схемы формирования лучей и характеристик антенны приемного канала аппаратуры получения данных о глобальной миграции животных // Труды ЛП Чтений, посвященных разработке научного наследия и развития идей К.Э.Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Казань, 2018. С. 63–69.
15. Беляев М.Ю., Бабкин Е.В., Волков О.Н., Заборовский В.С., Кондратьев А.С., Силенко А.В., Мулюха В.А., Ильяшенко А.С. Удаленное управление робототехническими объектами в космических экспериментах серии «Контур» на Международной космической станции // Ракетно-космическая техника. Сборник статей под редакцией М.Ю.Беляева. Серия XII. Выпуск 1–2. Королев: РКК «Энергия» им. С.П.Королева, 2015. С. 172–187.
16. Пат. 2763169 Российская федерация, МПКG01S 1/04 (2006.01) B64G 1/24 (2006.01). Способ контроля с орбитального космического аппарата движения потенциально опасного объекта, преимущественно ледника и оползня / М.Ю. Беляев, Д.Н. Рулев; заявитель и патентообладатель ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева», опубли. 28.12.2021. Бюл. № 1.
17. Пат. 2764148 Российская федерация, МПКG01S 1/04 (2006.01) B64G 1/24 (2006.01). Способ мониторинга с орбитального космического аппарата движения объекта преимущественно смещающихся природных масс ледника и оползня / М.Ю. Беляев, Д.Н. Рулев; заявитель и патентообладатель ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева», опубли. 13.01.2022. Бюл. № 2.

18. Боровихин П.А., Караваев Д.Ю. Алгоритм расчета двухстрочных элементов по заданному вектору состояния // Труды XLVI чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Казань, 2012. С. 94–102.
19. Микрин Е.А., Михайлов М.В. Ориентация, выведение, сближение и спуск космических аппаратов по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. 358 с.
20. Красная книга Российской Федерации. Том «Животные». 2-е издание. М.: ФГБУ «ВНИИ Экология», 2021. 1128 с.
21. Афанасьев М.А. Гнездование азиатского бекасовидного веретенника *Limnodromus semipalmatus* в окрестностях с. Сунтар (Сунтарский улус, Республика Саха (Якутия)) // Байкальский зоологический журнал. 2019. № 2 (25). С. 111–112.
22. В Якутии из-за засухи в Центральной Азии стал гнездиться бекасовидный веретенник. [Электронный ресурс]. URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/13579325> (дата обращения: 30.03.2022).
23. Новый этап изучения дупеля. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.craneland.ru/?p=16153> (дата обращения: 30.03.2022).
24. Птицы, МКС и пролетные пути. [Электронный ресурс]. URL: https://baikalapovednik.ru/news_archive2021/tpost/1fnrem5xu1-ptitsi-mks-i-proletnie-putihttps://baikalapovednik.ru/news_archive2021/tpost/1fnrem5xu1-ptitsi-mks-i-proletnie-puti (дата обращения: 30.03.2022)
25. Jetz, W., Tertitski, G., Kays, R., Lohr, A., Mueller, U., Wikelski, M., et al., Biological earth observation with animal sensors, *Trends in Ecology & Evolution*, April 2022, vol. 37, issue 4, pp. 293–298.
26. Чернецов Н.С. Ориентация и навигация мигрирующих птиц // Зоологический журнал. 2016. Т. 95. №2. С. 128–146.
27. Золотарев А.Д., Чернецов Н.С. Астрономическое ориентирование у птиц // Зоологический журнал. 2021. Т. 100. №3. С. 333–343.
28. Costa-Pereira, R., Moll R. J., Jesmer B. R., Jetz, W., Animal tracking moves community ecology: Opportunities and challenges, *Journal of Animal Ecology*, 2022, vol. 91(7), pp. 1334–1344.
29. Nathan, R., Monk Christopher, T., Arlinghaus, R., Adam, T., Alós, J., et al., Big-data approaches lead to an increased understanding of the ecology of animal movement, *Science*, 2022, vol. 375, eabg1780.
30. Kishkinev, D., Packmor, F., Zechmeister, T., Winkler, H.-C., Chernetsov, N., Mouritsen, H., Holland, R. A., Navigation by extrapolation of geomagnetic cues in a migratory songbird, *Current Biology*, 2021, vol. 31(7), pp. 1563–1569, doi: 10.1016/j.cub.2021.01.051.
31. Wikelski, M., Mueller, U., Scocco, P., Catorci, A., Desinov, L.V., Belyaev, M.Y., Keim, D., Pohlmeier, W., Fechteler, G., Mai, M., Potential short-term earth quake forecasting by faranimal monitoring, *Ethology*, 2020, vol. 126(9), pp. 931–941, doi: 10.1111/eth.13078.

Belyaev, M.Yu. (S.P. Korolev Rocket and Space Corporation (RSC) Energia, Korolev; Mytischki Branch (MB) of Bauman Moscow State Technical University, Mytischki), Volkov, O.N. (S.P. Korolev Rocket and Space Corporation (RSC) Energia), Solomina, O. N., and Tertitsky, G.M. (Institute of Geography, Russian Academy of Sciences (IGRAS), Moscow)

Animal Migration Studies with the Use of ICARUS Scientific Equipment in the URAGAN Space Experiment aboard the ISS RS, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 3 (118), pp. 3–19.

Abstract. The major challenges of space research are monitoring and exploration of our planet, which are carried out through the use of remote sensing satellites (RSS) operating in near-Earth orbits. They provide invaluable information for assessing the environmental, epidemiological and other situations on our planet, including animal migration data. The ICARUS System for Animal Tracking from the International Space Station (ISS), a joint Russian-German project on the ISS, is an ideal laboratory for in-orbit testing of instrumentation and various space technologies in order to refine methods for tracking movements of mammals and birds.

The paper analyzes the experience in the operation of the animal migration monitoring system installed in the Russian segment (RS) of the ISS (ISS RS). The system has accumulated the latest accomplishments in space science, satellite navigation, control technology, and microelectronics. The scientific results on the study of animal and bird migrations obtained within the Russian research program are briefly discussed.

Key words: International Space Station (ISS), space experiments, scientific equipment, animal migration studies.

Материал поступил 30.08.2022