



# Определение местоположения дельфинов космической системой «Надежда»

Владислав Рогальский, Николай Дедов, Вадим Подьячев

В статье приведены результаты определения трассы перемещения морских млекопитающих с помощью спутниковой космической системы «Надежда» и радиомаяков (РМ-Д), установленных на морских млекопитающих, в Черном и Охотском морях. Приведены характеристики спутниковой системы «Надежда» и радиопередатчиков РМ-Д. Показаны трассы перемещения дельфинов и белух летом-осенью 2001 г.

## Постановка задачи

В последние десятилетия для слежения за морскими животными, мигрирующими птицами и наземными млекопитающими активно используются космические системы [1, 2]. Специальные малогабаритные радиопередатчики размещают таким образом, чтобы они не ограничивали свободу перемещения животных и могли отсоединяться вместе с креплением после окончания срока службы источника питания. Программное устройство обеспечивает включение и выключение передатчика радиомаяка на время сеанса связи с низкоорбитальным искусственным спутником Земли (ИСЗ). По принятым от спутника сигналам наземные станции определяют номер радиомаяка, его координаты и время приема сообщения.

В 2001 году специалистами ИПЭЭ РАН (Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северского), ФГУП «РНИИ КП» (Российское НИИ космического приборостроения), ОКБ МЭИ (Особое конструкторское бюро Московского энергетического института) был осуществлен проект по определению местонахождения морских млекопитающих (дельфинов-афалин и белух) с помощью российской космической системы «Надежда» и специально разработанных миниатюрных радиомаяков.

Задача состояла в том, чтобы разработать и изготовить несколько радиомаяков, технически совместимых с системой «Надежда», установить их на животных и регулярно определять местоположение радиомаяков после возвращения животных в естественную

среду обитания. Знание местонахождения морских млекопитающих представляет интерес как в чисто научном плане, так и в практическом, поскольку позволяет выявить изменения районов обитания, которые, как правило, связаны с изменениями экологической обстановки в акваториях морей.

По требованиям специалистов ИПЭЭ космическая система должна определять координаты не реже, чем 1 раз в 1-5 суток с точностью не хуже 5 км в течение 3-5 месяцев.

Опытным путем установлено, что крупные животные и морские млекопитающие могут без существенных проблем для своих жизненных функций нести установленную на туловище или верхнем плавнике дополнительную нагрузку, не превышающую в диаметре 50 мм. Животное, имеющее собственный вес более 250 кг, способно нести радиомаяк весом около 1 кг. В этот вес включаются:

- корпус радиомаяка, обеспечивающий полную герметичность и прочность при ударах о твердые предметы;
- устройство для крепления прибора на животном («седло»);
- радиомаяк с передатчиком и задающим генератором;
- антенна и программно-временное устройство;
- источник питания, обеспечивающий работу радиомаяка в течение 3-6 месяцев.



Радиомаяк должен надежно функционировать во всем диапазоне температур воды, в которой живут дельфины и белухи. Этот диапазон составляет от +5 до +25°C для дельфинов-афалин и от -2 до +25°C для белух. Конструкция корпуса радиомаяка (РМ) должна обеспечивать его крепление на верхнем плавнике дельфина или на спине белухи. После окончания срока службы батарей конструкция должна отсоединяться от животного и освобождать его от бесполезной нагрузки, замена источников питания производится в лабораторных условиях.

Радиопередающие устройства для системы «Надежда» имеют минимальный вес 80 грамм при выходной мощности 0,5 Вт, а время их непрерывной работы от литиевых батарей ёмкостью 1 А·ч составляет 186 суток [1].

### ХАРАКТЕРИСТИКИ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «НАДЕЖДА»

Для слежения за морскими млекопитающими использовалась находящаяся в эксплуатации подсистема «Курс» спутниковой системы «Надежда» Росийского авиакосмического агентства (Росавиакосмос) [3], которая рассчитана на надежное определение координат стандартных аварийных радиобуев с 5-ваттным передатчиком. Требуемое снижение веса радиомаяка дельфиньего (РМ-Д) до 1 кг было обеспечено за счет снижения мощности передатчика до 1 Вт и уменьшения ёмкости батарей питания благодаря микропроцессорному управлению режимами энергопотребления.

Спутниковая система «Курс» предназначена для сбора метеорологической и экологической информации с неподвижных и медленно движущихся объектов при одновременном определении их местоположения в любой точке земного шара. Система использует бортовую радиотехническую аппаратуру, установленную на ИСЗ, находящемся на круговой околополярной орбите с высотой 1000 км. Бортовой приемник-процессор в течение сеанса связи принимает от 4 до 16 посылок от РМ. Для каждой посылки он выделяет цифровые данные, содержащие номер РМ и другую вспомогательную информацию, измеряет доплеровский сдвиг частоты с точностью до 0,3 Гц и обеспечивает привязку измеренных значений частоты с точностью 10 мс к московскому времени. Цифровые данные, а



также значения доплеровского сдвига и времени его измерения записываются в бортовую память ИСЗ. Будучи принятыми на наземной станции приема и обработки информации, эти данные совместно с точно известными эфемеридами спутника позволяют вычислить координаты РМ с точностью 1-5 км в зависимости от стабильности частоты радиомаяка в течение сеанса связи [4].

С января 1997 года система «Курс» находится в опытной эксплуатации под управлением ГП «Морсвязьспутник» Минтранса России. В 2002 г. планируется запустить очередной ИСЗ системы «Надежда», на котором бортовой радиоконкомплекс будет работать как с системой КОСПАС, так и с системой «Курс». В дальнейшем на всех спутниках, обеспечивающих функционирование системы «Надежда» в соответствии с международными обязательствами России, будет установлена аппаратура приема и обработки сигналов от РМ системы «Курс». Наземные станции приема и обработки сигналов с ИСЗ расположены в Москве, Архангельске и Находке.

### ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОМАЯКА ДЛЯ ДЕЛЬФИНОВ

Расчеты показывают [4], что требуемая номинальная мощность сигнала на входе бортового приемника обеспечи-

вается на расстоянии 2500 км, если мощность РМ, излучаемая в направлении ИСЗ, не менее 0,5 Вт. Реальная минимальная мощность сигнала на входе приемника будет зависеть от согласованности поляризации антенн ИСЗ и антенны РМ. При неблагоприятных положениях антенн реальная мощность сигнала от РМ может оказаться ниже допустимого значения. Оценка вероятности такого события в течение сеанса, проведенная в ходе экспериментов, показала, что в этом случае от РМ, имеющего выходную мощность 1 Вт, обеспечивается принятие 40% посылок [1].

Передача сигнала с водной поверхности при установке РМ-Д на морских млекопитающих имеет свои сложности, связанные с включением передатчика на излучение только тогда, когда антенна находится над водой. Согласно своей природе дельфины и белухи периодически всплывают на поверхность для дыхания на несколько секунд; этого времени, в принципе, достаточно для излучения радиомаяком посылки длительностью 440 мс.

Задача включения передатчика при всплытии животного на поверхность воды была успешно решена специалистами ОКБ МЭИ.

Помимо мощности очень важной характеристикой РМ является стабильность частоты передатчика. Известно, что наилучшей стабильностью

Таблица 1. Зависимость точности определения координат радиомаяка от стабильности частоты

Стабильность частоты ( $\Delta f/f$ ) в течение сеанса связи (15 мин)	$1,5 \times 10^{-9}$	$3,5 \times 10^{-9}$	$7 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$3,5 \times 10^{-8}$	$7 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$>1,5 \times 10^{-7}$
Средняя квадратическая ошибка определения координат, км	<0,1	0,2	0,4	1	2	4	10	>10

обладают термостатированные кварцевые задающие генераторы, которые применяются в аварийных радиобуях и радиомаяках спутниковой системы «Надежда». Они обеспечивают стабильность частоты в течение сеанса связи (15 мин) не хуже  $10^{-8}$ , а долговременную стабильность не хуже  $5 \times 10^{-6}$ . Однако вес таких генераторов и потребляемая ими от источника питания мощность исключают возможность их применения в описываемом случае.

Использование нетермостатированных кварцевых генераторов приводит к снижению средневременной стабильности до  $10^{-7}$ . В табл. 1 показана зависимость точности определения спутниковой системой «Надежда» координат РМ от стабильности частоты [5].

Из данных табл. 1. следует, что при использовании термостатированных задающих генераторов точность определения координат может быть не хуже 1 км, а при использовании нетермостатированных — не лучше 4 км.

Снижение по сравнению со стандартным радиобуем мощности радиомаяка до 1 Вт и стабильности частоты позволяет создать радиомаяк для дельфинов весом 750 грамм, «заплатив» за это снижением точности определения координат и вероятности их получения в каждом сеансе связи РМ-Д с ИСЗ с учетом сложности прогноза нахождения животного на поверхности моря.

Функциональная схема РМ-Д приведена на рис. 1, а общий вид его радиопередатчика показан на рис. 2.

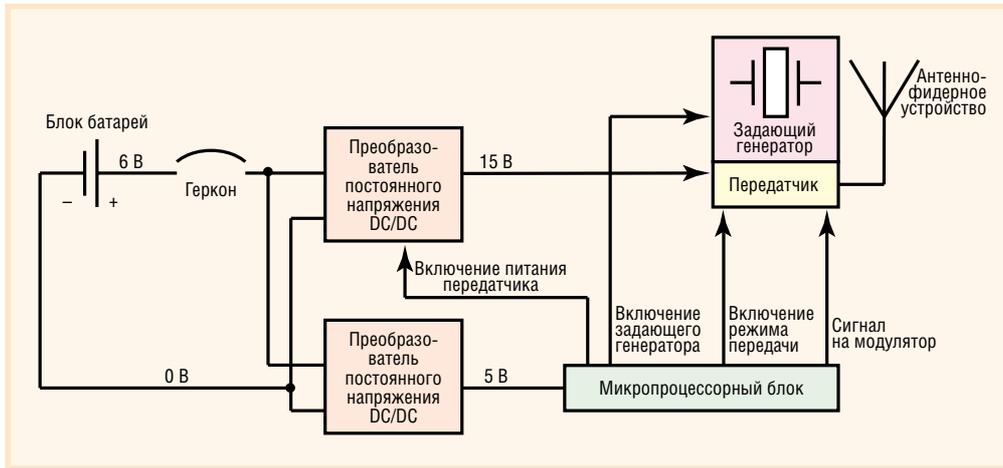


Рис. 1. Функциональная схема радиомаяка РМ-Д



Рис. 2. Радиопередатчик РМ-Д

Радиомаяк работает следующим образом.

До начала работы контакт геркона разомкнут под влиянием воздействия поля магнита. При снятии внешнего магнита контакт геркона замыкается, и на DC/DC-преобразователь подается напряжение питания. DC/DC-преобразователь обеспечивает преобразование первичного напряжения батарей  $=6-7$  В в стабильное напряжение  $=15$  В питания передатчика с кпд не хуже 85% и в напряжение питания микропроцессора  $=5$  В.

Микропроцессор при подаче напряжения питания вырабатывает следующие сигналы:

- сигнал включения DC/DC-преобразователя, вырабатывающего напряжение  $=15$  В, который служит для питания передатчика; сигнал вырабатывается таймером микропроцессора, который запрограммирован так, что питание передатчика включено 5 часов в сутки;
- сигнал включения задающего высокочастотного генератора передатчика (выходные каскады передатчика при этом не запитаны, вследствие чего потребляемый передатчиком ток не превышает 300 мкА);
- сигналы включения режима передачи, которые выдаются в течение 5 часов в сутки с периодом 30 секунд и имеют длительность 440 мс (при включении режима передачи в ан-

тенну РМ-Д подается высокочастотный сигнал мощностью 0,8-1,0 Вт, принимаемый бортовой аппаратурой ИСЗ; при этом передатчик потребляет ток около 130 мА от источника  $=15$  В);

- сигнал модуляции выходного высокочастотного сигнала передатчика, обеспечивающий передачу в течение 160 мс немодулированной несущей и в течение 280 мс передачу информации.

Антенна представляет  $\lambda/4$ -вибратор и выполнена в виде стержня из монокристаллической меди диаметром 2 мм, помещенного в изоляционную оболочку. Она обладает гибкостью во всех плоскостях. Нетермостатированный задающий генератор имеет несущую частоту 22 МГц. В качестве элементов питания используются две литиевые батареи. Все элементы РМ-Д размещены в корпусе из титана диаметром 30 мм.

Исходя из номинальной емкости литиевых батарей 4,2 А·ч, длительности функционирования РМ-Д от одного комплекта батарей и циклограммы пролета ИСЗ над районом Черного моря, было принято решение ограничить ежедневное время работы РМ-Д до 5 часов с периодом повторения посылки 30 секунд. В этом случае общее время работы РМ-Д от одного комплекта батарей составляет около 6 месяцев.

### Натурные испытания

В течение 1999-2001 годов проводились испытания для отработки конструкции РМ-Д. Было изготовлено 3 технологических образца с разными типами корпусов и вариантами крепления.

Натурные испытания РМ-Д в июле 2001 г. в естественных условиях проводились на базе ИПЭЭ РАН в районе мыса Малый Утреш (Чёрное море) с использованием трех образцов РМ-Д, которые были установлены на дельфинах, плавающих в закрытой ванне размером 4 на 9 метров (рис. 3). Испытания показали, что при работе в бассейне период передачи посылок 30 секунд является недостаточным для надежного определения координат, так как в этом случае на ИСЗ принимается в среднем 3,2 посылки за сеанс связи. Подробный анализ времени приема посылок в течение сеанса связи показал, что существует ограниченный участок времени длительностью 1-4 мину-



Рис. 3. Дельфин с установленным радиопередатчиком РМ-Д во время испытаний в бассейне (июль 2001 г.)

ты, в течение которого посылки принимаются на ИСЗ. Вероятная причина — затенение плавником дельфина направления на ИСЗ и искажение диаграммы направленности антенны РМ-Д. Было принято решение уменьшить период повторения посылок до 15 секунд при установке РМ-Д на дельфина. Кроме того, был сделан вывод о необходимости крепить цилиндрический корпус РМ-Д к «седлу» с помощью пластмассовых зажимов, которые не подвергаются коррозии в соленой морской воде.

С учетом результатов натурных испытаний было изготовлено 8 доработанных образцов РМ-Д. Их основные технические характеристики были измерены на специальном стенде ФГУП «РНИИ КП». Структурная схема стенда представлена на рис. 4. Проверка параметров радиомаяка проводилась в диапазоне температур от +5 до +25°С.

В процессе испытаний РМ-Д были определены технические характеристики, средние значения которых приведены в табл. 2.

17 июля 2001 г. первый передатчик РМ-Д был установлен на белухе в заливе Канчалан (10 км севернее-восточнее г. Анадыря, Берингово море), второй передатчик РМ-Д был установлен на дельфине в районе мыса Малый Утреш (15 км южнее г. Анапы, Черное море) 13 сентября 2001 г.

Данные от радиомаяков принимались на станциях приема и обработки информации системы «Надежда». Вторичная обработка информации проводилась специалистами ФГУП «РНИИ КП», после чего итоговые данные передавались в ИПЭЭ РАН по электронной почте с задержкой не более 48 часов.

На рис. 5. приведена полученная таким образом трасса перемещения белухи с момента установки на нее передат-

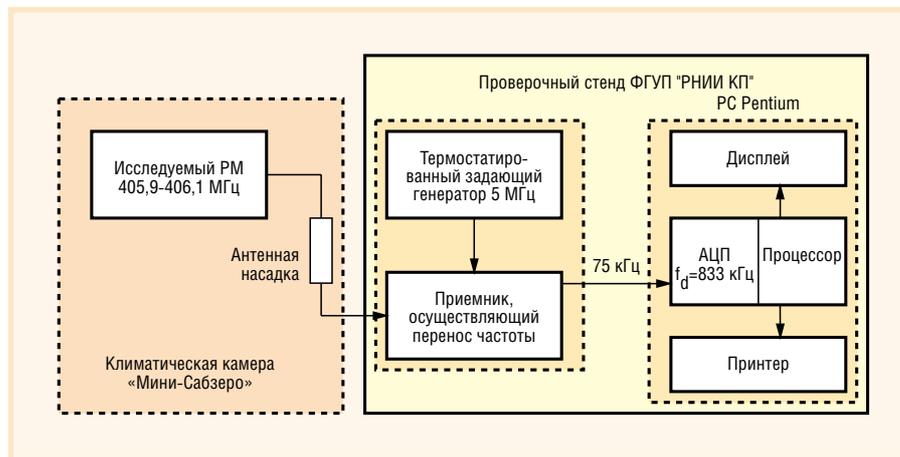


Рис. 4. Структурная схема стенда для испытаний и сертификации радиомаяков (РМ-405) и аварийных радиобуев (АРБ-406)

Таблица 2. Основные технические характеристики РМ-Д

Параметр	Величина
Несущая частота, МГц	406,027-406,023
Тактовая частота, Гц	399,9-400,1
Индекс модуляции, рад	1,1-1,2
Кратковременная стабильность (0,1 с)	$7 \times 10^{-8}$
Линейный дрейф за 15 минут	$5 \times 10^{-8}$
Средняя квадратическая ошибка отклонения от линейного дрейфа	$1,5 \times 10^{-8}$

чика 17 июля 2001 г. до получения последнего сообщения 17 сентября 2001 г. Всего в течение 63 суток было проведено 145 определений местонахождения, что составило в среднем 2,3 определения за сутки.

На рис. 6 приведена трасса перемещения дельфина-афалины от момента установки на него передатчика 13 сентября 2001 г. до момента принятия последнего сообщения 6 ноября 2001 г. Всего за 55 суток было проведено 28 определений мес-

тонахождения, что составило в среднем 1 определение за двое суток.

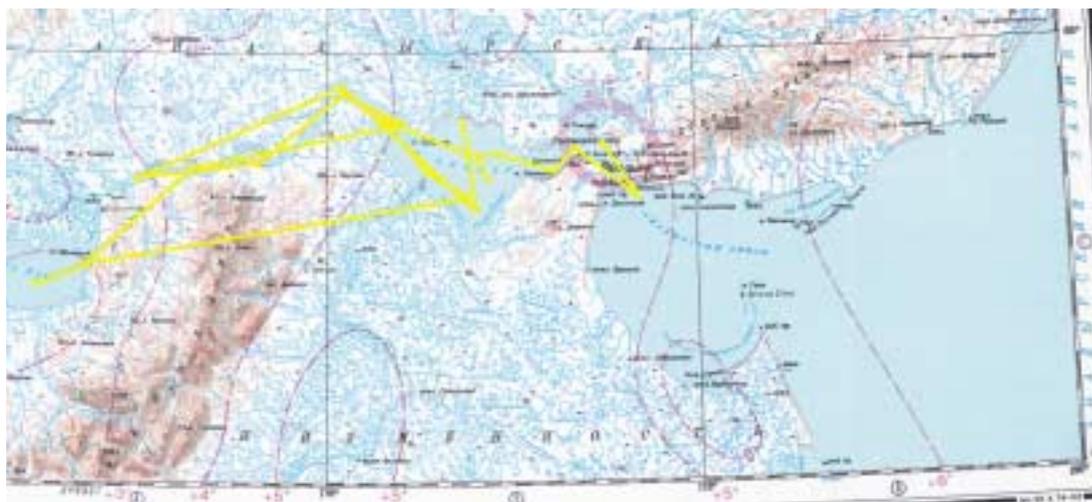


Рис. 5. Трасса перемещения белухи в июле-сентябре 2001 г., определенная спутниковой системой «Надежда»

Количество успешных определений координат местонахождения сильно зависит и от того, на каком животном установлен РМ-Д. Белуха не имеет верхнего плавника, что существенно увеличивает вероятность приема посылок на ИСЗ и определения координат, даже несмотря на увеличенный по отношению к дельфину в 2 раза (до 30 секунд) период повторения посылок. Верхний плавник дельфина существенно искажает диаграмму направленности

антенны, что приводит к сокращению числа посылок, принятых на ИСЗ, даже при уменьшении периода повторения посылок до 15 секунд. Необходимо заметить, что определение координат системой производится только в том случае, если от РМ получено три и более посылок. Кроме того, чем ниже широта нахождения РМ, тем меньшее количество сеансов связи между радиомаяком и спутником осуществляется за фиксированное время (район плавания дельфина-афалины в Черном море на  $20^\circ$  южнее по широте, чем район плавания белухи).

Среднее число посылок, принятое на ИСЗ в сеансах связи, составило для белухи 5,6 (период повторения 30 секунд), а для афалины — 4,9 (период повторения 15 секунд). Разница обусловлена не только искажением и затенением диаграммы направленности антенны верхним плавником дельфина (у белухи в процессе эволюции верхний плавник исчез, так как мешал плаванию в высоких широтах, где часто моря покрыты льдом), но и тем, что в районах Восточной Сибири и Дальнего Востока в диапазоне 400 МГц меньше помех по



Рис. 6. Трасса перемещения дельфина в сентябре-ноябре 2001 г., определенная спутниковой системой «Надежда»

сравнению с центральными районами России [1].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты представленной работы показывают, что в России освоена технология слежения за морскими млекопитающими с помощью спутниковой космической системы «Надежда».

Чувствительность и производительность бортового приемника-процессора ИСЗ позволяет надежно принимать сигналы одновременно от 100 морских радиомаяков с выходной мощностью 1 Вт, находящихся в зоне видимости ИСЗ, и определять их координаты.

*Авторы выражают глубокую благодарность за тщательно отредактированный текст статьи, полезные советы и рекомендации, а также за предоставленную возможность осуществления данной работы начальнику лаборатории ИПЭЭ РАН Мухаметову Льву Михайловичу. ●*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Селиванов А. С., Рогальский В. И., Дедов Н. В., Подъячев В. Г. Определение трассы перелета журавлей с помощью Космической системы КОСПАС-«Курс» // Space bulletin. — 1998. — № 2.
2. P. Jouventin, H. Weimerskzich. Satellite tracking of wandering albatroses // Nature. — February, 1990. — Vol. 343. — № 6260.



4. Балашов А. И., Зурабов Ю. Г., Пчеляков Л. С., Рогальский В. И., Шебшаевич В. С. Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие. — М.: Радио и связь, 1987.

5. Guide to the ARGOS system. — 1989. — Issue 1.

**Авторы — сотрудники  
ФГУП РНИИ космического  
приборостроения и ОКБ МЭИ  
Телефоны: (095) 273-9744;  
273-3731  
Факс: (095) 273-5943; 362-5576**

3. Селиванов А. С., Рогальский В. И., Дедов Н. В. Космическая система сбора природоресурсных данных с наземных платформ и определения их местоположения («Курс») // Современные технологии автоматизации. — 1997. — № 3.