Комплекс радиометров миллиметрового и теплового ИК диапазонов для БПЛА

Бордонский Г.С., Казанцев В.А., Козлов А.К.

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

e-mail: lgc255@mail.ru

Актуальность

Использование БПЛА с установленными на нем **сканирующими микроволновыми радиометрами в миллиметровом и ИК диапазонах** позволит осуществить:

1) оперативность сбора данных о состоянии земной или водной поверхности;
2) всепогодность метода ДЗЗ, т.к. туман, слабый облачный покров не вносят существенного вклада в получаемую информацию;
3) получение информации о состоянии исследуемого объекта с существенно более высоким пространственным разрешением по сравнению с дециметровым и см диапазонами;
4) мониторинг различных объектов в труднодоступных местах;
5) решать широкий круг научно-практических задач, особенно для криосферных образований.

Цель настоящей работы – изучить возможности радиометрических микроволновых измерений в миллиметровом диапазоне при использовании низколетящих аппаратов, таких как БПЛА.

Схема сканирующего радиометрического комплекса, установленного на БПЛА

Микроволновые радиометры построены по схеме модуляционных супергетеродинных приемников с преобразователем частоты на входе. Радиометр ИК диапазона регистрирует сигнал пироэлектрическим модулем ПМ-4. Модуляция осуществляется диском прерывателем пучка излучения. В этом приборе для повышения эффективности его работы осуществляется сканирование диаграмм направленности путем вращения зеркала, при этом производится как сканирование исследуемой поверхности, так и нагрузки, расположенной в корпусе прибора.

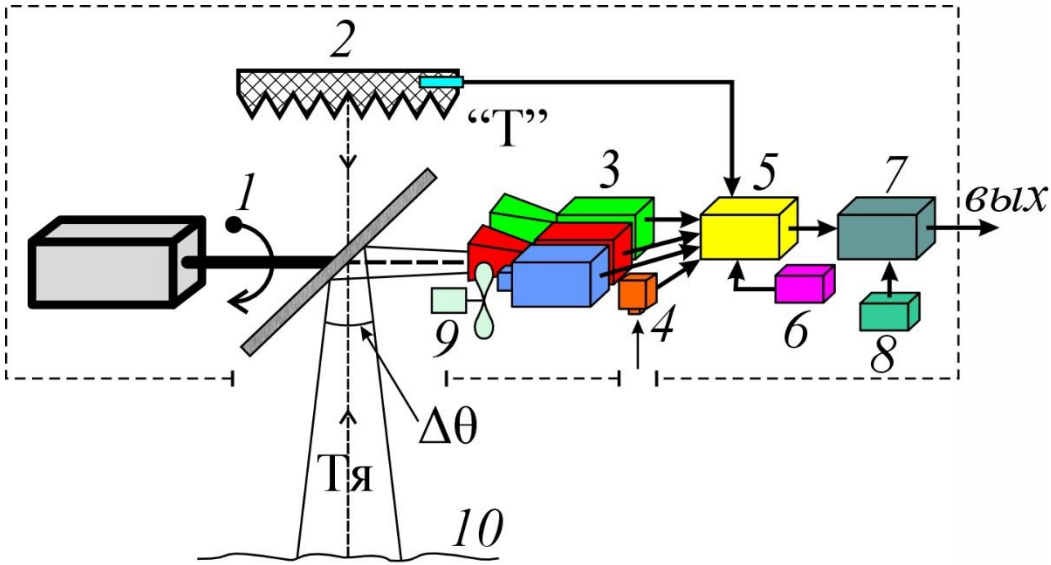


Рис. 1. 1 – сканирующая система; 2 – эталон черного тела; 3 – радиометры на длины волн 0,88 см, 0,33 см и 8…14 мкм; 4 – видеокамера; 5 – блок питания и управления приборами; 6 – аккумуляторные батареи; 7 – система сбора информации; 8 – навигационная система; 9 – модулятор; 10 – исследуемая поверхность; “Т” – датчик температуры эталона черного тела; Δθ – ширина диаграммы направленности антенн радиометров

Параметры радиометрического комплекса

1. В комплексе представлены 3 радиометра в широком спектральном интервале от 14 мкм до 0,88 см, что позволяет эффективно исследовать слабо увлажненные поверхностные образования для анализа их состояния. Переход в миллиметровый диапазон позволил существенно уменьшить габариты антенной системы и создать простую конструкцию сканирующего устройства (1): рис. 1.

2. Радиометры комплекса представляют из себя супергетеродины с преобразователями частоты на входе на волны 0,33 см и 0,88 см. Чувствительность радиометров ~ 0,1 К при постоянной времени 0,1 с. Предполагается, после первых испытаний комплекса, установить на входе радиометров транзисторные усилители для повышения их флуктуационной чувствительности в 3-4 раза.

3. Радиометр ИК диапазона – детекторный на пироэлектрическом модуле ПМ-4 с дополнительной линзой на входе. Он имеет отдельный модулятор (9) в виде прерывателя пучка излучения. Его флуктуационный порог чувствительности не хуже 0,1 К при постоянной времени 0,1 с.

4. Сканирующее устройство (1) имеет вращающееся зеркало, отражающее излучение от исследуемого объекта в угле $\Delta\theta$, составляющим значения от 4° (для 0,33 см) до ~10° (для 0,88 см), в ИК диапазоне этот угол ~8°.

5. Сигналы с выходов приборов записываются на магнитный носитель в системе сбора информации (7).

Параметры радиометрического комплекса

6. Скорость сканирования связана со скоростью движения аппарата и регулируется до его взлета установкой в одно из трех состояния зеркала: 0,15; 0,7; 1,5 оборотов/сек для трех различных скоростей полета: 10; 5; 1 м/с на высоте 10 м и постоянных времени накопления от 0,01 с до 0,1 с. Вблизи перпендикуляра к траектории полета предполагается регистрация пяти пикселей изображения.

7. При вращении зеркала также производится запись теплового излучения эталона черного тела (2), установленного внутри корпуса с радиометрами.

8. При подготовке комплекса к работе он подключается к внешнему блоку для контроля функционирования и прогрева приборов. При запуске комплекса он переключается на внутренние литий-ионные аккумуляторы (6).

9. В процесса полета осуществляется GPS навигация (8) и запись углов тангажа и крена (8) для коррекции изменения угла зондирования. На приборе имеется штатная камера записи изображений в видимом диапазоне. Масса прибора составляет ~ 4 кг, потребляемый ток 1 А при напряжении аккумуляторной батареи ~ 11 В.

Общий вид радиометрического комплекса

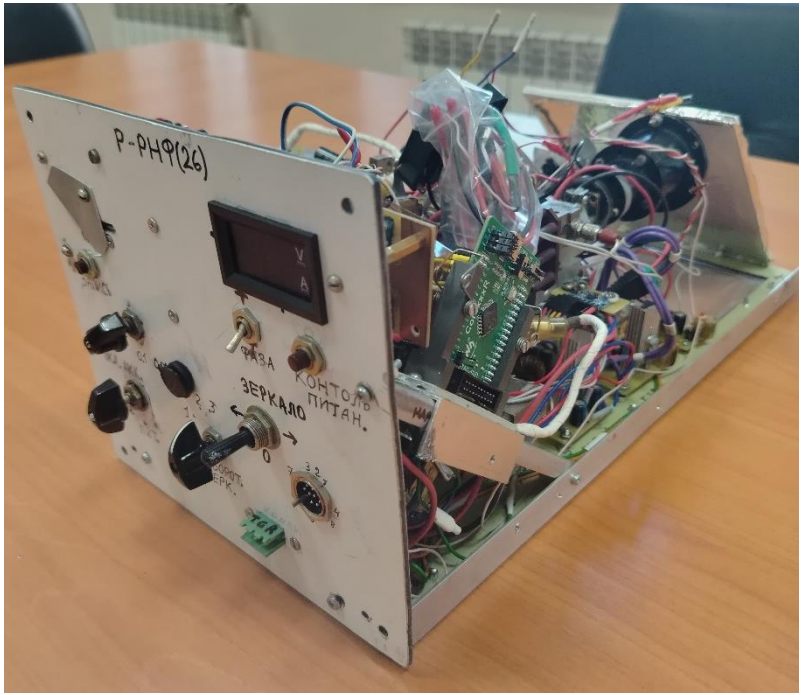


Рис. 2. Фотография прибора со снятой крышкой



Рис. 3. Вид прибора в сборке на борту БПЛА

Некоторые результаты апробирования сканирующего радиометрического комплекса

Предварительно проводились стационарные измерения снежного покрова. Радиометры устанавливались на высоте ~1 м над поверхностью снега. Диаграммы направленности антенн и объектива ИК-радиометра по уровню 0,5 составляют около 7°. Угол наблюдения составлял ~45° и измерения выполнены на вертикальной поляризации. Калибровку осуществили по излучению безоблачного неба и эталонам черного тела. Ошибки измерений порядка 1 К.

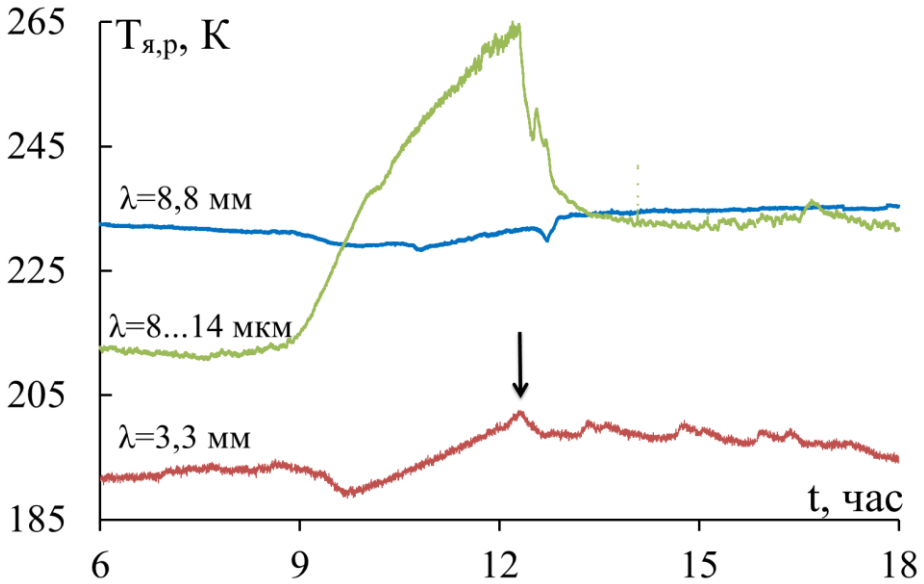


Рис. 4. Изменение радиояркостной температуры снежного слоя на волнах 3,3 мм и 8,8 мм и радиационной температуры в тепловом ИК диапазоне от времени. Стрелкой отмечена аномалия радиотеплового излучения вблизи температуры образования льда 0 в слоях снега при его нагревании в дневное время. Дата измерений: 26.02.2026 г.

Некоторые результаты апробирования сканирующего радиометрического комплекса

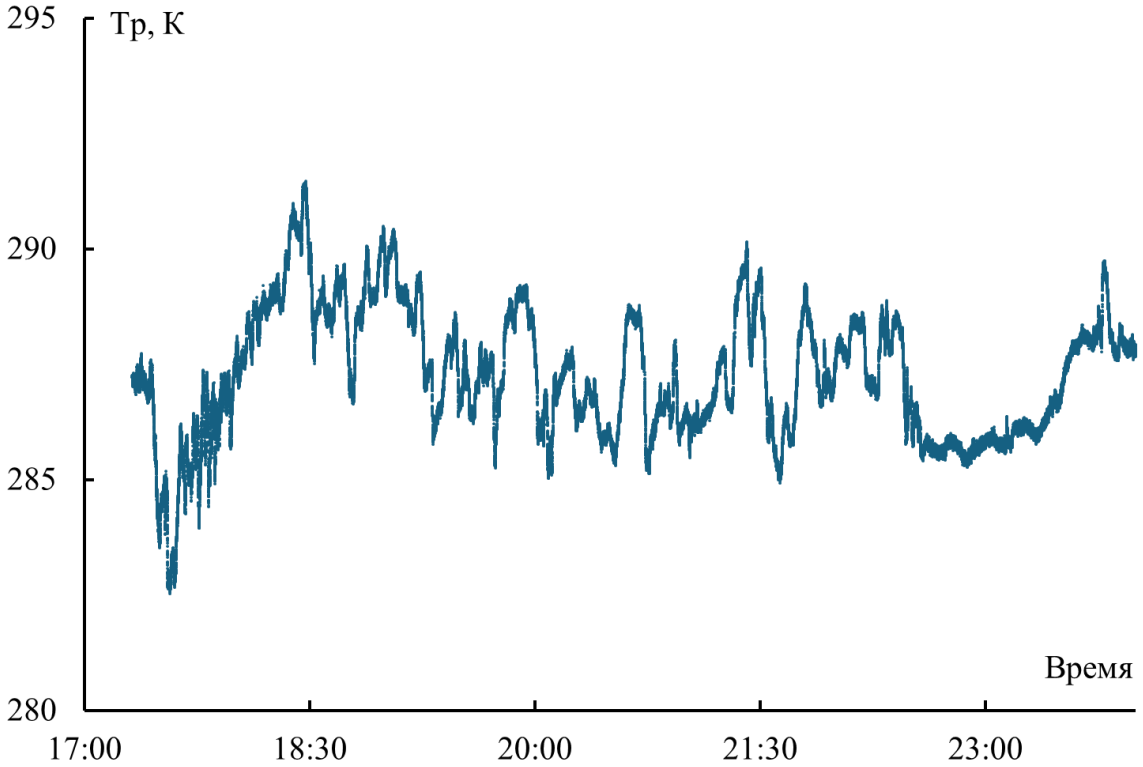


Рис. 5. Радиационная температура в тепловом ИК диапазоне и замерзающей пресной воды в кювете на диэлектрической подложке при температуре воздуха от 0°C (17:00) до –15°C (23:00). Сильные флуктуации температуры возможно связаны с появлением кластеров льда перед образованием ледяного покрова. Дата измерений: 02.11.2026 г.

Выводы

- Предложенная радиометрическая система, представляющая из себя мобильную сканирующую систему из двух микроволновых радиометров на длины волн 0,33 см и 0,88 см, а также ИК радиометра и камеры видимого диапазона, принимающих излучение в широком спектральном интервале, является усовершенствованием методики измерений при использовании БПЛА для целей ДЗЗ небольших природных образований.

- Первые лабораторные испытания показали эффективность использования прибора, особенно для исследования криосферных образований вблизи фазовых переходов воды (при 0°C и –23°C).

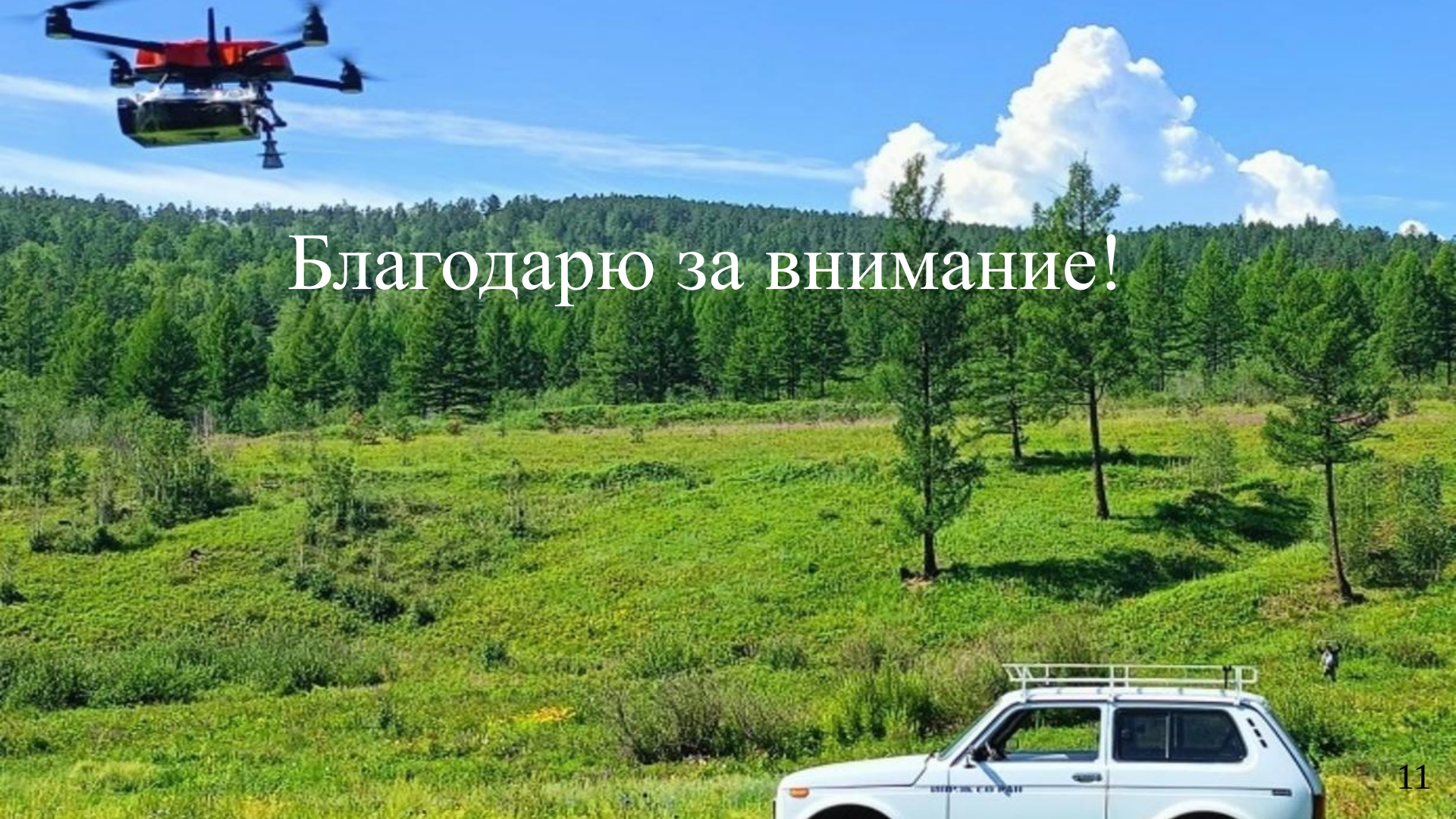
- В ближайшее время будут выполнены полетные испытания для получения изображений различных природных объектов для дальнейшего выяснения возможностей предложенной системы.

Благодарности и финансирование

- Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-27-00533 «Разработка и изучение возможностей применения сканирующего радиометра миллиметрового диапазона с использованием БПЛА»



Российский
научный фонд


Благодарю за внимание!