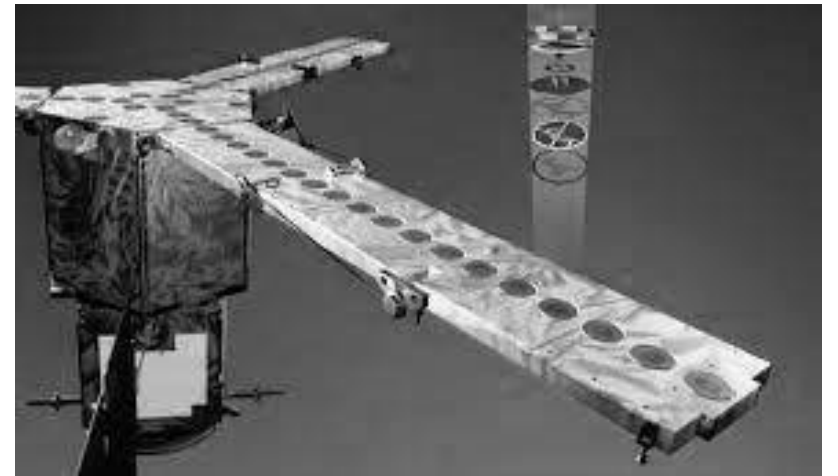
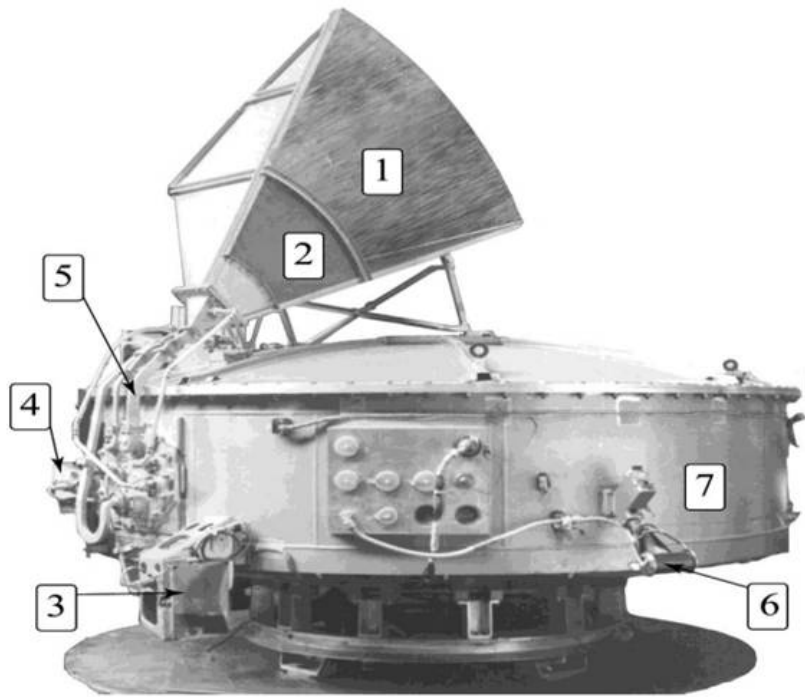


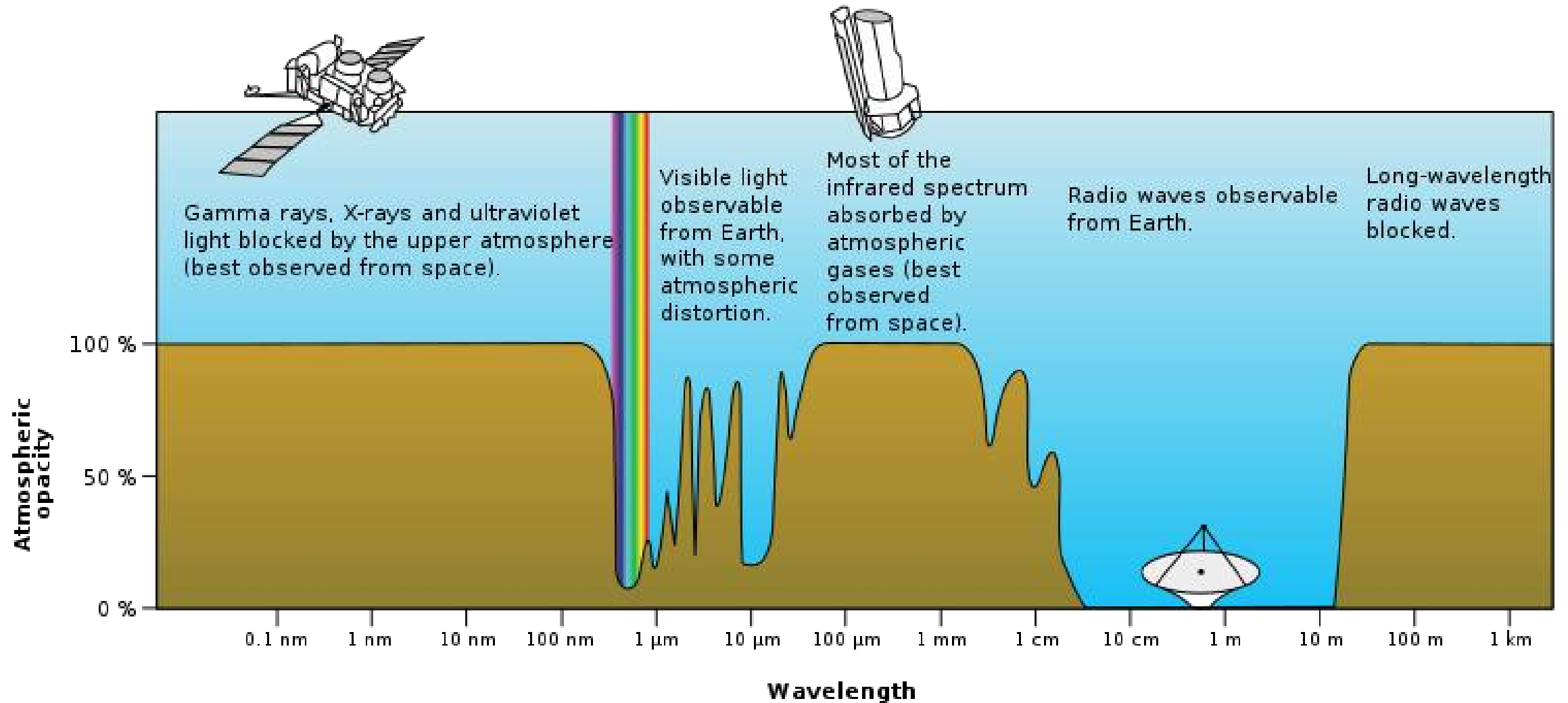
История и перспективы развития средств спутниковой микроволновой радиометрии



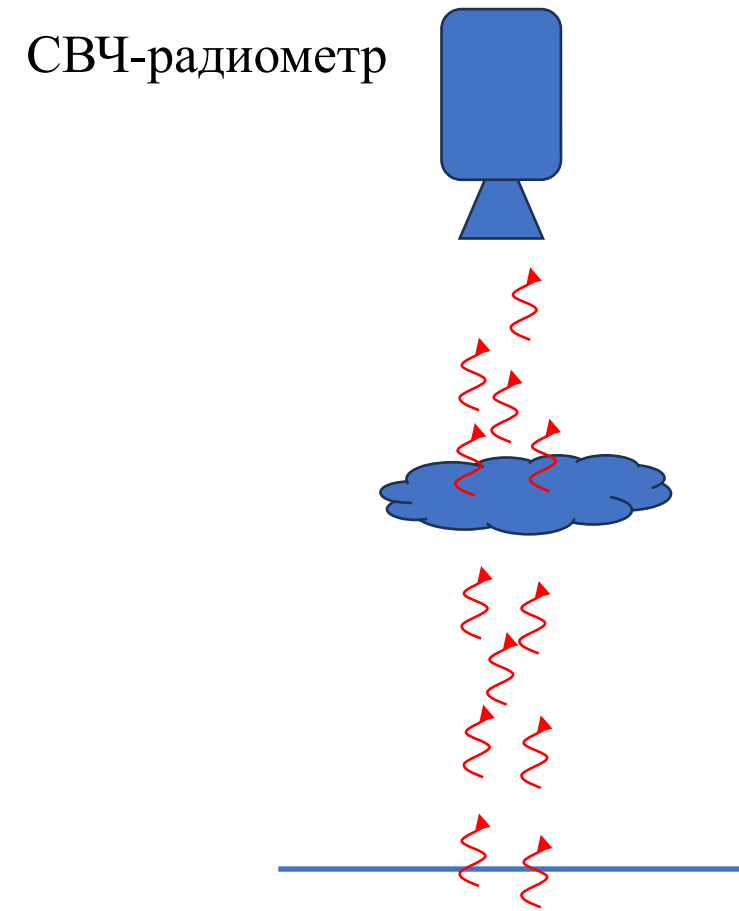
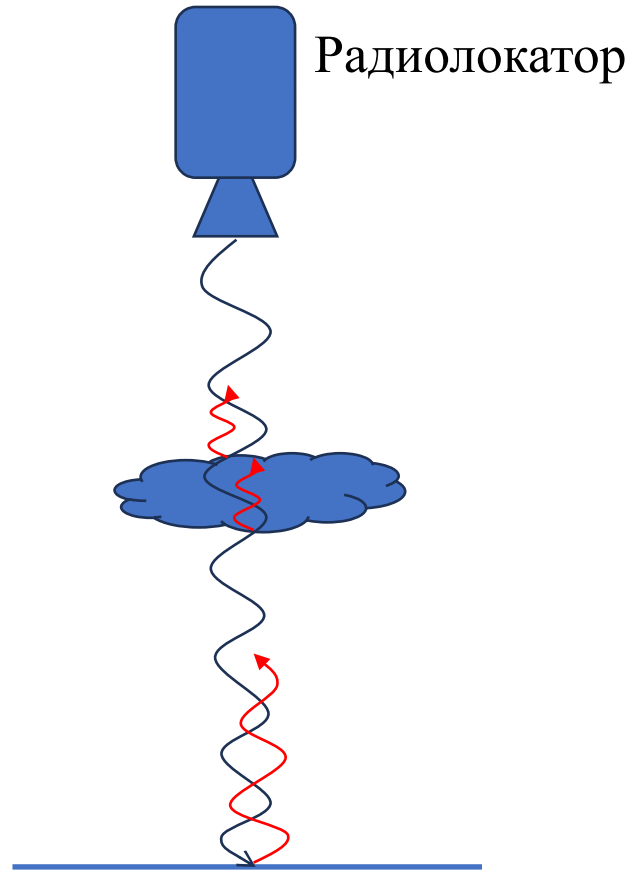
Д.М. Ермаков (ИКИ РАН)

Пассивная микроволновая (СВЧ) радиометрия

Пассивный метод дистанционного исследования объектов интереса, основанный на измерениях характеристик их **собственного теплового излучения** в диапазоне длин волн от ~ 1 мм до ~ 1 м.



Фундаментальная взаимодополняемость радиолокации и СВЧ-радиометрии



Источники радиотеплового ДЗЗ: радиоастрономия

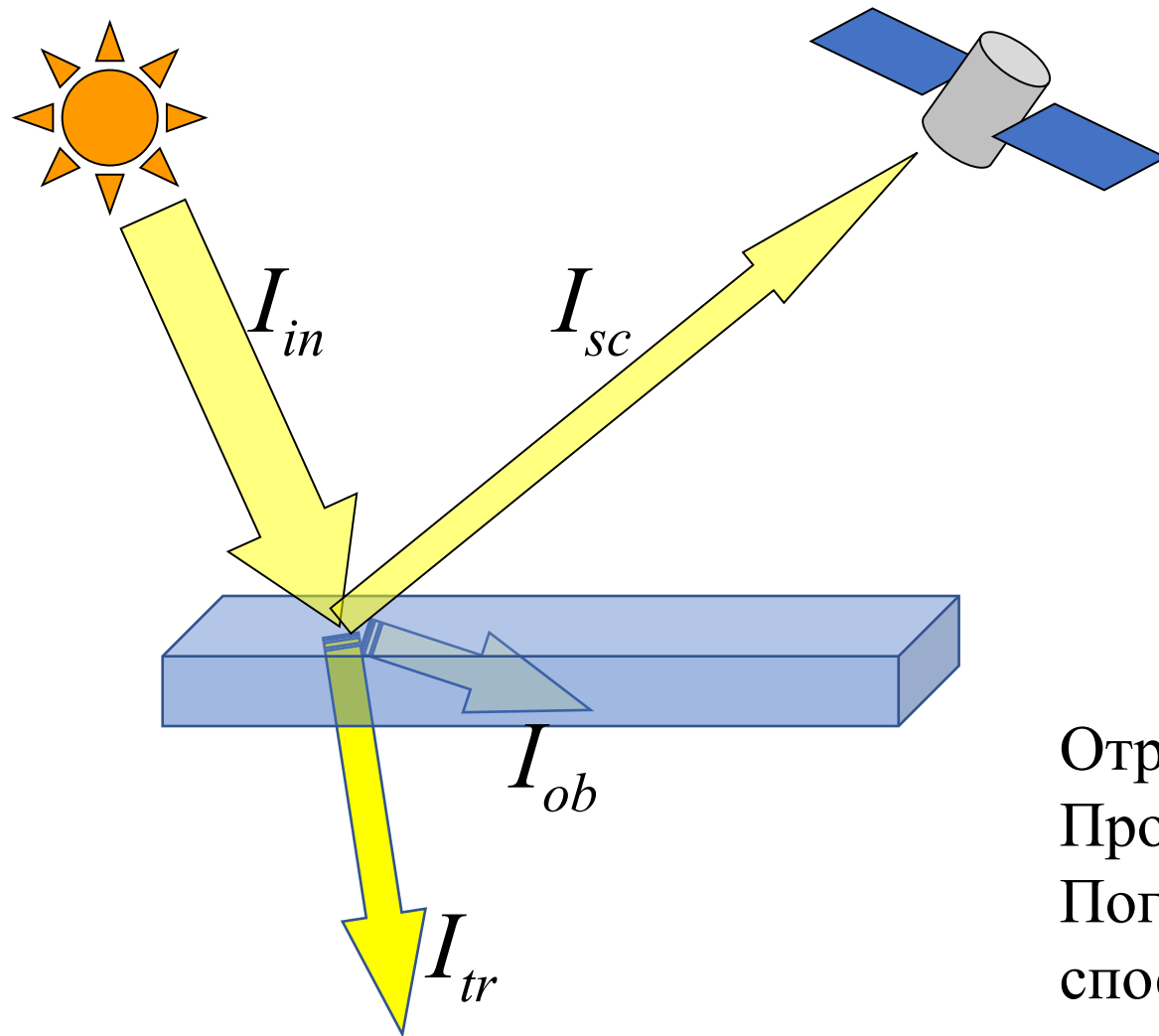
Dicke R.H. The measurement of thermal radiation at microwave frequencies // The Review of Scientific Instruments. 1946. V. 17. N. 7. P. 268–275.

Dicke R.H., Beringer R., Kyhl R.L., Vane A.B. Atmospheric absorption measurements with a microwave radiometer // Physical review. 1946. V. 70. N. 5–6. P. 340–348



Роберт Генри Дикке (1916 – 1997)

Отражательная, поглощательная, пропускная способности



$$I_{in} = I_{sc} + I_{tr} + I_{ob}$$

$$1 = (I_{sc} + I_{tr} + I_{ob}) / I_{in}$$

$$1 = \rho + \tau + \varepsilon$$

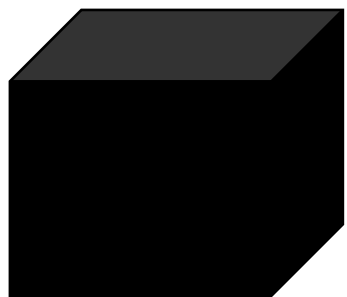
Отражательная ...

Пропускная ...

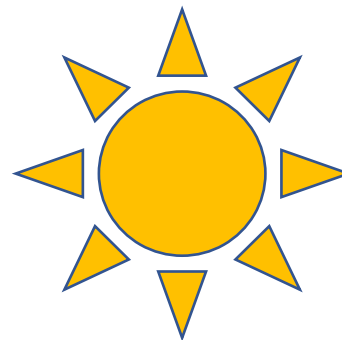
Поглощательная/излучательная
способности вещества

Соотношения между ними зависят от частотного диапазона и направления распространения излучения, температуры объекта

Абсолютно черное тело



$$1 = \rho + \tau + \varepsilon$$
$$\rho = \tau = 0, \varepsilon = 1$$

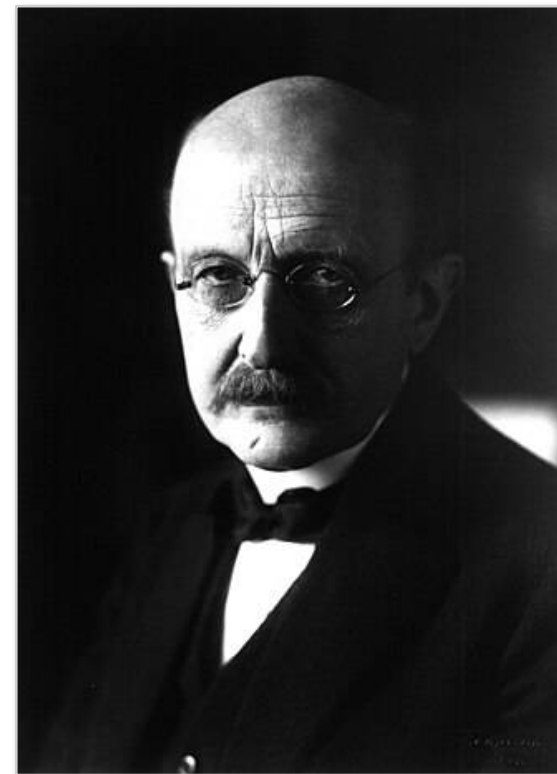


Излучение абсолютно черного тела подчиняется
закону Планка

$$B(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\frac{hc}{e^{\lambda kT}} - 1}$$

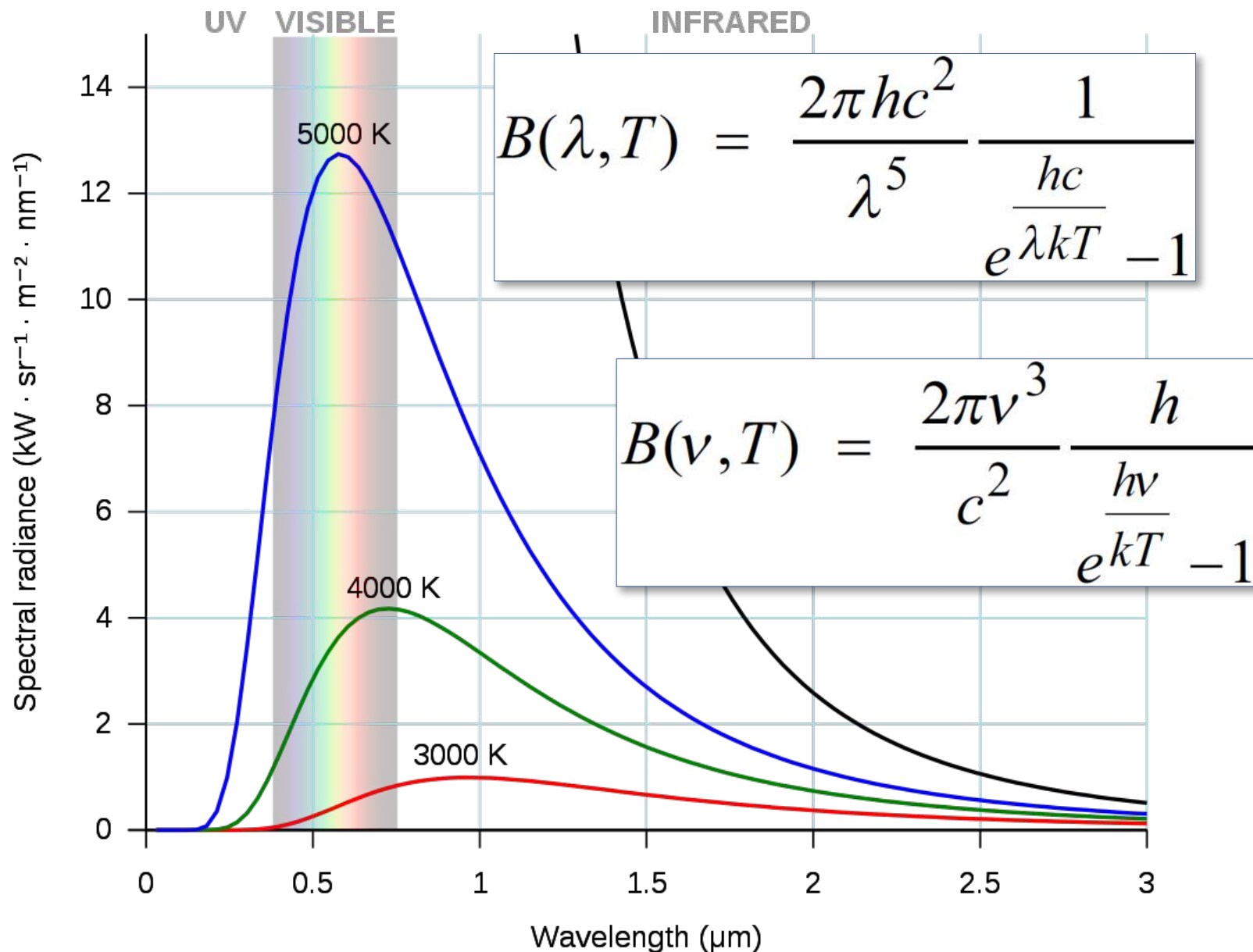
или

$$B(\nu, T) = \frac{2\pi \nu^3}{c^2} \frac{h}{\frac{h\nu}{e^{kT}} - 1}$$



Макс Карл Эрнст Людвиг
Планк (1858 – 1947)

Свойства чернотельного излучения



$$B(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

$$B(\nu, T) = \frac{2\pi \nu^3}{c^2} \frac{h}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Закон смещения Вина:

$$\lambda_{max} \sim 1/T$$

Закон Рэля-Джинса:
 $B(T) \sim T$ при $h\nu/kT \ll 1$

Закон Кривгофа. Понятие яркостной температуры

Энергия, излучаемая черным телом,

$$B = \rho B + \tau B + \varepsilon B$$

равна сумме энергий, рассеиваемой, пропускаемой и поглощаемой серым телом.

Из условия термодинамического равновесия следует, что энергия, излучаемая серым телом,

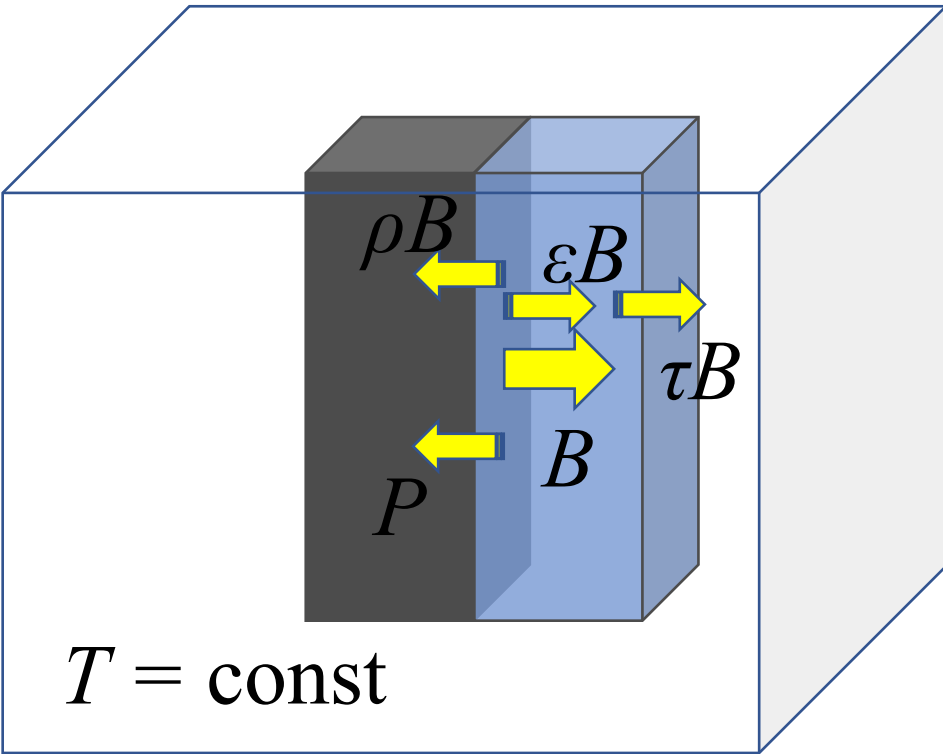
$$P = \varepsilon B$$

равна поглощаемой энергии излучения черного тела.

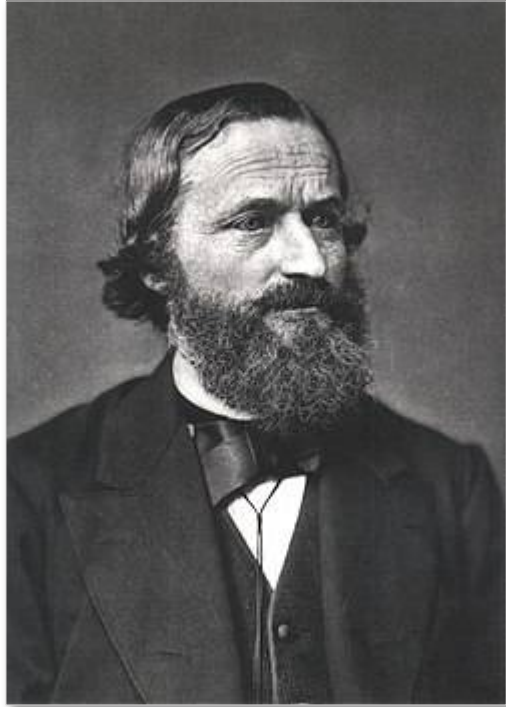
То есть, ε – и коэффициент поглощения, и коэффициент излучения.

$$\text{Если } B(T) \sim T, \text{ то } P(T) = \varepsilon B(T) \sim \varepsilon T \equiv T_{br}$$

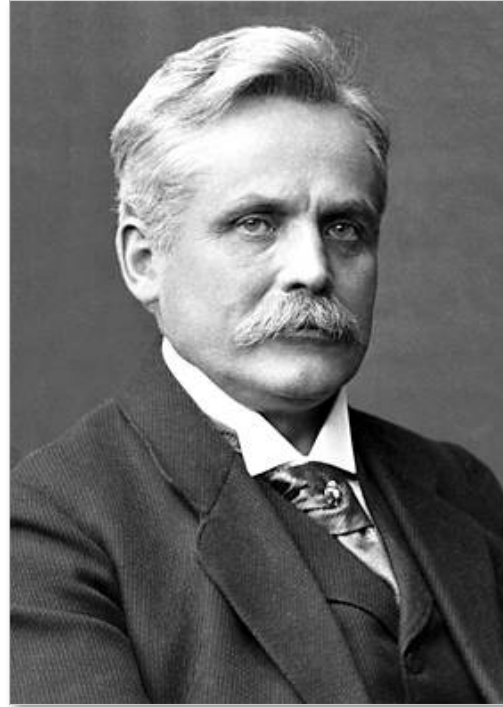
T_{br} – (радио)яркостная температура тела при термодинамической, равной T .



Четыре совершенно разных человека



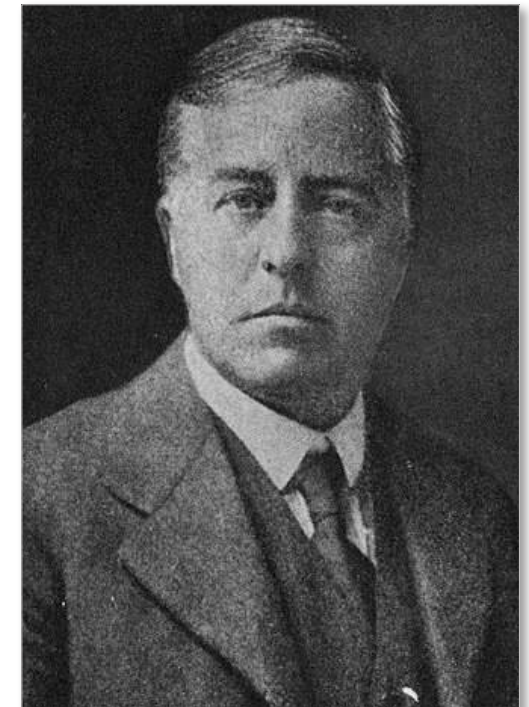
Густав Роберт Кирхгоф
(1824 – 1887)



Вильгельм Карл Вернер
Отто Фриц Франц Вин
(1864 – 1928)

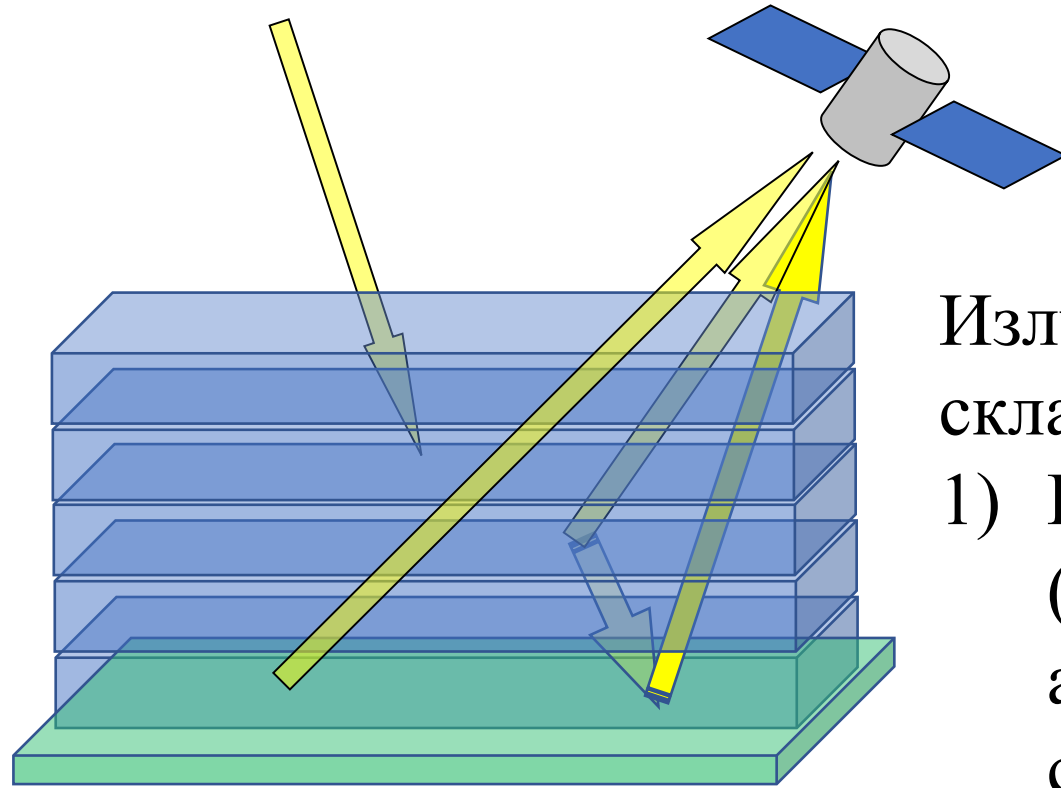


Джон Уильям Стретт
Рэлей (1842 – 1919)



Джеймс Хопвуд Джинс
(1877 – 1946)

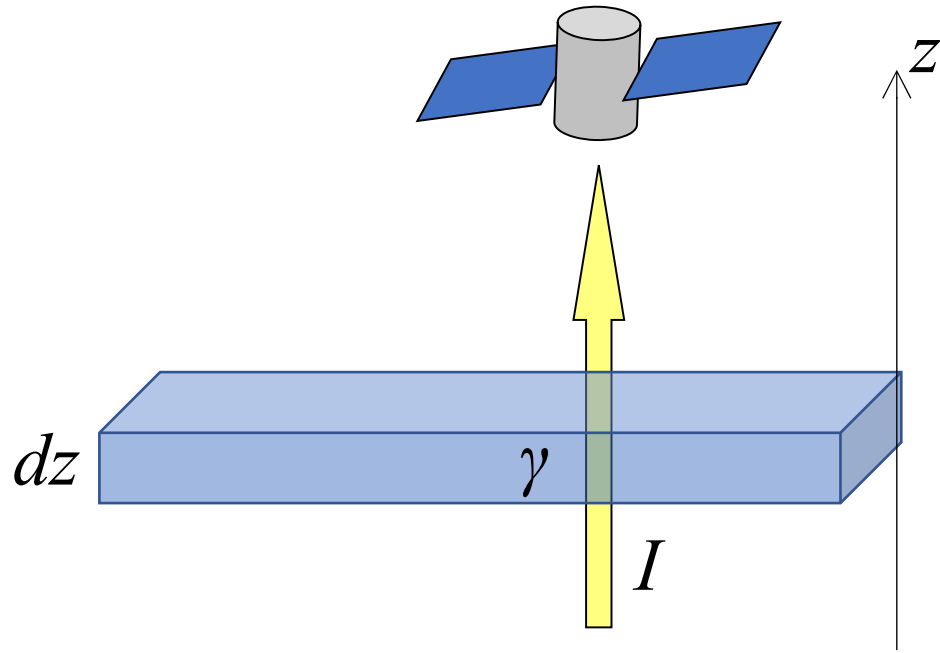
Формирование восходящего радиотеплового (собственного) излучения Земли



Излучение, регистрируемое со спутника, складывается из нескольких компонент:

- 1) Восходящего собственного (теплового) излучения слоев атмосферы, ослабленного верхними слоями;
- 2) Нисходящего излучения атмосферы, частично отраженного подстилающей поверхностью и ослабленного в слоях атмосферы;
- 3) Собственного излучения подстилающей поверхности;
- 4) Внешнего излучения.

Ослабление радиоизлучения в атмосферном слое



Ослабление излучения, распространяющегося в заданном направлении, может быть обусловлено **поглощением** и **рассеянием**.
Погонный коэффициент ослабления γ в слое dz :

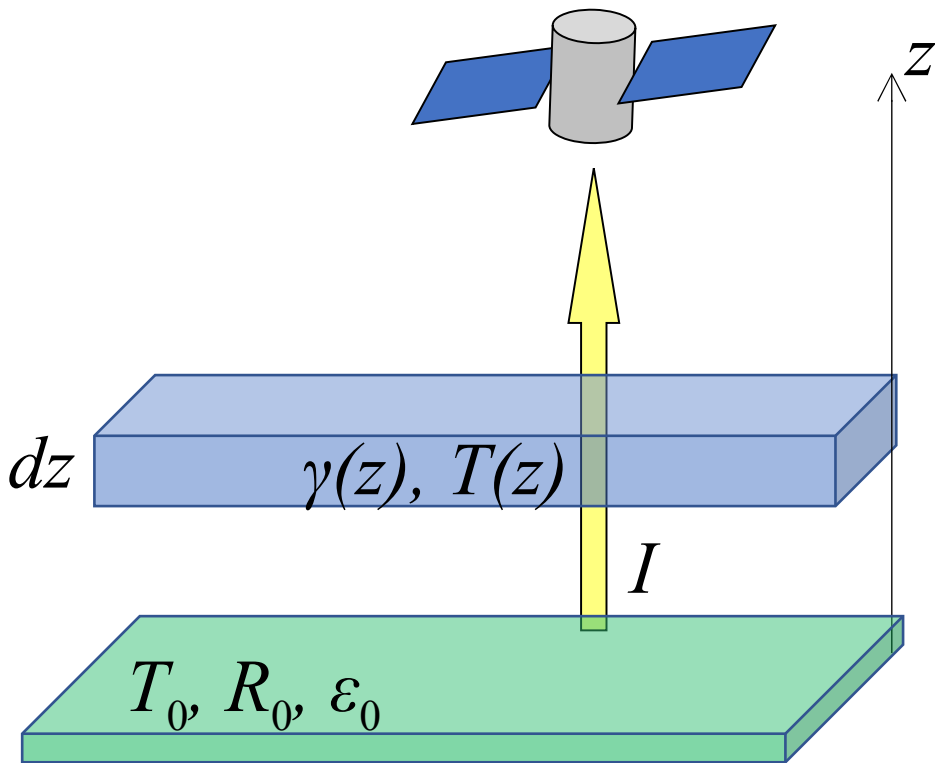
$$dI/dz = -\gamma I$$

Отсюда:
$$I(z) = I_0 \exp \left(- \int_0^z \gamma(z) dz \right)$$

Оптическая толщина атмосферы:
$$\tau = \int_0^{+\infty} \gamma(z) dz$$

В микроволновом диапазоне ослабление излучения **безоблачной атмосферой** в основном связано с **поглощением на газовых компонентах** H_2O и O_2 .

Уравнение вертикального переноса излучения в слабо рассеивающей среде



Космическое излучение, отраженное поверхностью

Регистрируемая яркостная температура

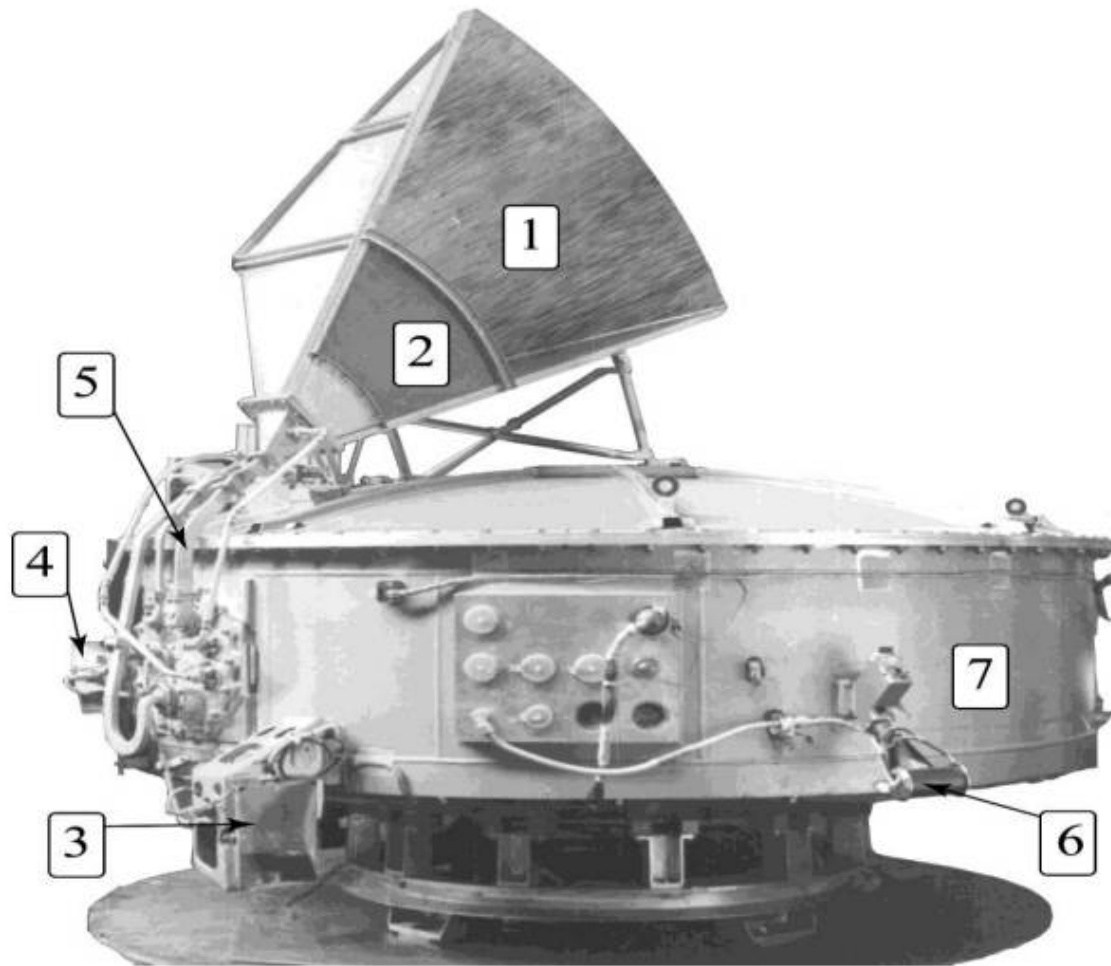
Излучение подстилающей поверхности

Восходящее излучение слоя

$$\begin{aligned} T_{br} = & \text{Излучение подстилающей поверхности} \\ = & T_0 \varepsilon_0 \exp(-\tau) \text{ Восходящее излучение слоя} \\ & + \int_0^\infty T(z) \gamma(z) \exp\left(-\int_z^\infty \gamma(h) dh\right) dz \\ & + R_0 \exp(-\tau) \int_0^\infty T(z) \gamma(z) \exp\left(-\int_0^z \gamma(h) dh\right) dz \\ & + R_0 T_r \exp(-2\tau) \end{aligned}$$

Нисходящее излучение слоя, отраженное поверхностью

«Космос-243» (1968), «Космос-384» (1970)



Характеристики СВЧ радиометров

ПАРАМЕТР	КАНАЛЫ			
	1	2	3	4
Длина волны, см	8.5	3.4	1.35	0.8
Флуктуационная чувствительность, К	0.7	0.6	1.3	1.9
Ширина луча антенны, град.	8.6	4.0	3.6	4.0

Фрагмент слайда презентации: **Б.Г. Кутуза, Л.М. Митник, А.Б. Аквилонова** «Первый в мире эксперимент по микроволновому зондированию Земли из космоса на спутнике “Космос-243”», XVI Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, 12 – 16 ноября 2018 г.

Радиоизлучение Земли как планеты. Башаринов, Гурвич, Егоров (1974).



Анатолий Евгеньевич
Башаринов (1920 – 1978)



РАДИОТЕЛЕСКОПЫ ПОТЯГНУТ НА ЗЕМЛЮ



...орые от-
...сборка
...итальной
...тре вни-
...и за ру-
...ниже
...конкрет-
...ученых,
...ествив-
...спутник
...радио-
...атмос-
...иссле-
...амму
...дуще-

Однако наблюдения за обла-
ками из космоса с помощью
обычного или инфракрасного
телевидения не дают возмож-
ности увидеть то, что нахо-
дится под облаками. В связи
с этим ученые во всем мире
занимаются поисками путей
усовершенствования методов
спутниковых измерений для
определения физических па-
раметров атмосферы: темпе-
ратуры, давления, влажности
воздуха, интенсивности осад-
ков и других. Сложность
здесь состоит в том, что един-
ственной доступной для изме-
рения величиной является
электромагнитное излучение
атмосферы и поверхности
Земли — собственное тепло-
вое или рассеянное солнечное.
Задача может быть решена
только в результате комплекс-
ного использования всего
спектра собственного тепло-
вого излучения атмосферы — от
инфракрасного до радиоволно-
вого — и отраженной солнеч-
ной радиации.

На запуском 23 сентября
1968 года спутнике «Космос-
243» был впервые в мире осу-

ществлен глобальный экспери-
мент по приему теплового ра-
диоизлучения Земли и ее ат-
мосферы. Для этого на спут-
нике были размещены чувст-
вительные приемники тепло-
вого радиоизлучения в диапазо-
не волн от 8 миллиметров до
8 сантиметров с антеннами,
направленными на Землю. Эти
приемники и антенны во мно-
гом аналогичны наземным ра-
диотелескопам и отличаются
от них полной автоматизаци-
ей. Таким образом, спутник
представлял собой автоматиче-
скую радиоастрономиче-
скую обсерваторию в космосе.
На нем был установлен также
узкополосный приемник ин-
фракрасного излучения.

Наклон орбиты спутника к
экватору составлял 71,3 гра-
дуса, и это позволяло обсле-
довать полярные районы
вплоть до 71-го градуса широты.
Результаты измерений
передавались в запоминаю-
щем устройстве и по команде
передавались на Землю по
радиотелеметрической линии
при прохождении спутника
над территорией СССР.

Какие же дополнительные
преимущества открывает ис-
пользование теплового радио-
излучения для определения
параметров атмосферы? Пре-
имущества заключаются пре-
жде всего в том, что радио-
волны сантиметрового диапа-
зона достаточно хорошо про-
никают через облака, совер-
шенно непрозрачные для ви-
димого и инфракрасного излу-
чения. Это дает возможность
определять температуру по-
верхности сквозь преграду об-
лаков и осадков. Волны ми-
ллиметрового диапазона заме-
тно поглощаются каплями
воды, что позволяет по спек-
тру излучения на этих волнах
не только обнаружить облака
и осадки, но и измерить со-
держание капельной воды, об-
наружить очаги интенсивных
осадков, скрытые мощными
облаками. Наконец, в санти-
метровом и миллиметровом
диапазонах находятся резонан-
сные линии поглощения
водяного пара, поэтому, из-
меряя интенсивность радиоиз-

лучения на соответствующи
браванных волнах, можно опре-
делить и содержание водяного
пара, т. е. влажность воздуха.

Специальные расчеты пока-
зали и проведенный экспери-
мент подтвердил, что наиболее
полные данные по определе-
нию параметров атмосферы
получаются при полете спут-
ника с научной аппаратурой
над океанами. Это обстоя-
тельство особенно ценно, так
как получаемые в настоящее
время сведения об атмосфере
именно над океанами крайне
скудны. Между тем океаны
являются гигантскими аккумуля-
торами солнечной энер-
гии, которую они отдают в
виде скрытой теплоты испаре-
ния. Эта теплота в значитель-
ной степени «питает» энерги-
и гигантские циклоны, опре-
деляющие погоду на планете.

Кроме того, по собствен-
ному радиоизлучению над океа-
ном легко определить наличие
льда на поверхности воды.
Спутник «Космос-243» за
первые же сутки полета на-

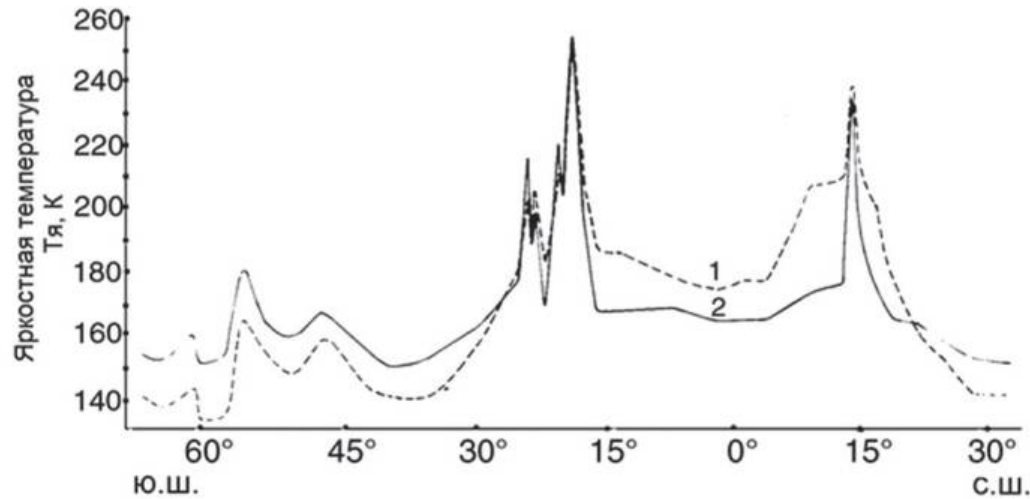
дежно определил границы
сплошных льдов вокруг Ан-
тарктиды.

Результаты проведенного
эксперимента далеко не исчер-
пываются составлением карты
льдов. Получены, например,
меридиональные разрезы тем-
пературы поверхности воды в
Тихом океане от Берингова
моря до Антарктиды. Полу-
чение такого разреза за очень
короткое время — всего не-
сколько десятков минут —
представляет большой интерес
для океанологии.

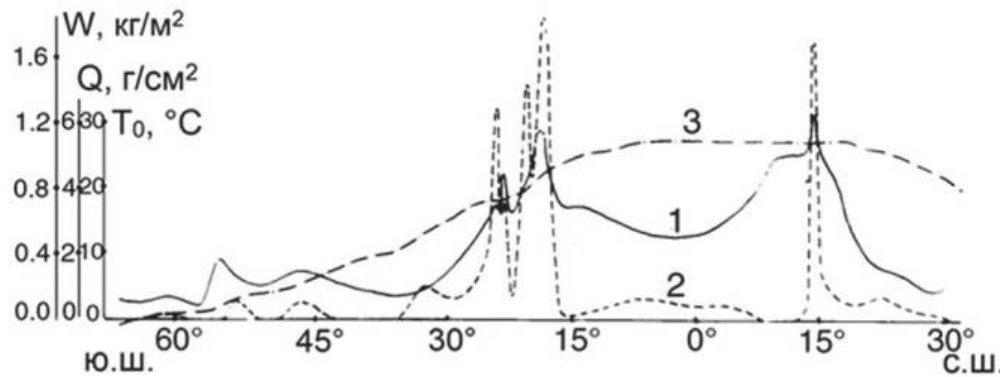
Одновременное измерение
излучения на различных вол-
нах сантиметрового и милли-
метрового радиодиапазонов и
использование инфракрасно-
го излучения на спутнике
«Космос-243» принесло ученым
обширные данные об ат-
мосфере и поверхности Зем-
ли. В недалеком будущем из-
мерения теплового радиоизлу-
чения Земли будут широко ис-
пользоваться для исследова-
ния процессов, происходящих
в атмосфере, в океанах, при
анализе метеорологической
обстановки — при долгосроч-
ном прогнозировании погоды и
состояния моря.

А. ОБУХОВ — член-корреспон-
дент АН СССР; Д. ИЛЬИ-
ЧЕВ — доктор технических
наук; А. БАШАРИНОВ — про-
фессор; А. ГУРВИЧ, С. ЕГО-
РОВ — кандидаты техниче-
ских наук.

Первые спутниковые радиотепловые измерения



а



б

Из статьи:

Б.Г. Кутуза, Л.М. Митник, А.Б. Аквилонova.
Первый в мире эксперимент по микроволновому зондированию Земли из космоса на спутнике «Космос-243» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 6. № 6. С. 9–30.
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-9-30

Исходно предполагалось (см. «Радиоизлучение Земли как планеты»), что связь между яркостными температурами и атмосферными параметрами может быть описана линейными регрессиями!

Рис. 2. Профили: а — яркостной температуры на длинах волн 1,35 см (1) и 0,8 см (2); б — паросодержания атмосферы (1) и водозапаса облаков (2) по измерениям над Тихим океаном 23 сентября 1968 г. (8–9-й витки). Пунктирная линия 3 на рис. 2б — температура поверхности воды вдоль подспутниковой траектории по климатическим данным

Основатели научных школ по ДЗЗ (включая радиофизику) в СССР



Кирилл Яковлевич Кондратьев
(1920 – 2006)

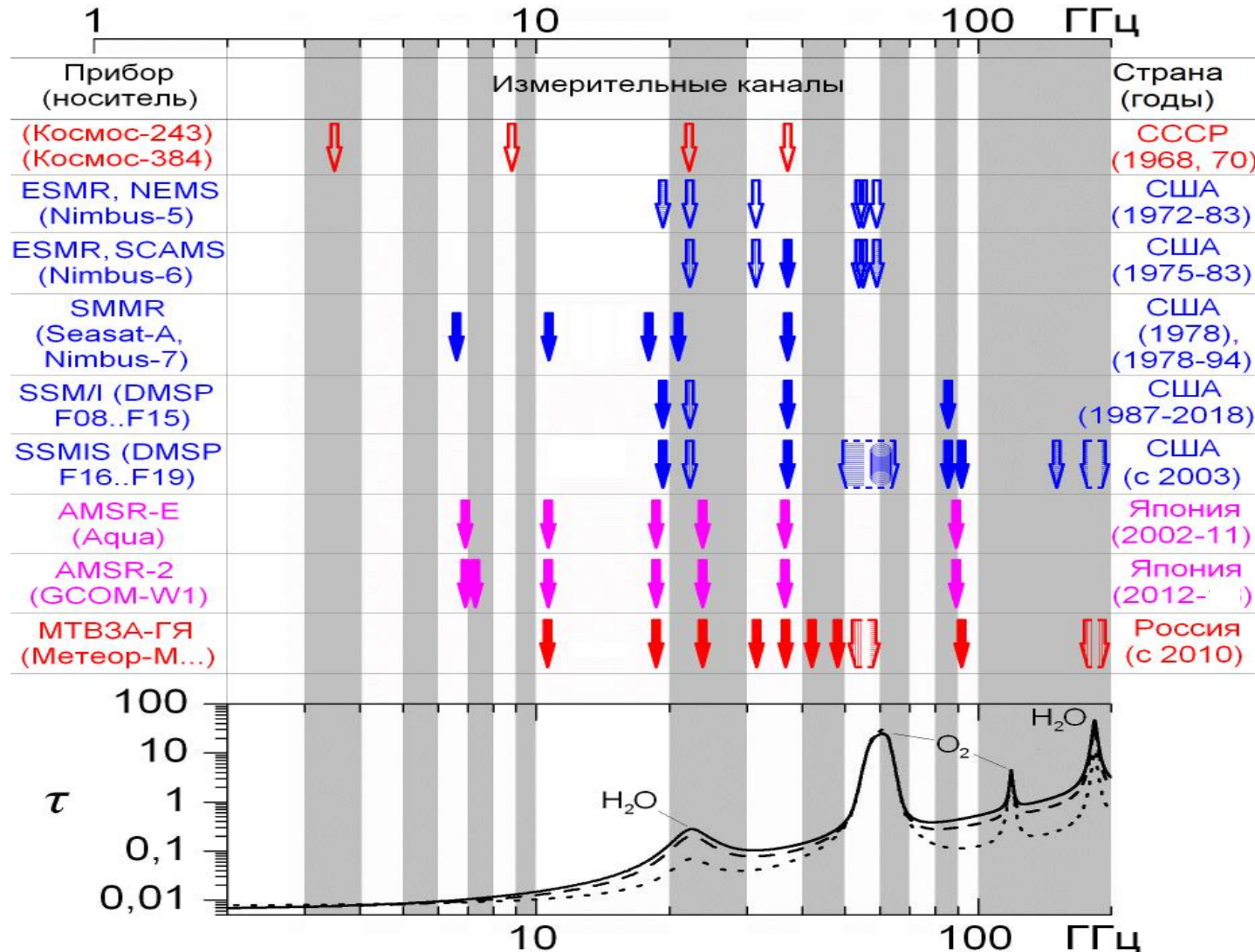


Неон Александрович Арманд
(1932 – 2009)



Валентин Семенович Эткин
(1931 – 1995)

Хронология развития СВЧ-радиометрических спутников



Petty G.W. On the response of the Special Sensor Microwave/Imager to the marine environment – implications for atmospheric parameter retrievals. A dissertation ... for the degree of doctor of philosophy. University of Washington, Seattle, USA. 1990. 313 p.

Алгоритмы восстановления интегрального влагосодержания атмосферы

$$Q = 11,98 \ln(280 - T_{19V}) + 42,06 \ln(280 - T_{19H}) - 54,36 \ln(280 - T_{22V}) - 20,5$$

[Petty, 1990]

$$Q = 171,4 + 4,638 \ln(300 - T_{19V}) - 61,76 \ln(300 - T_{22V}) + 19,58 \ln(300 - T_{37H})$$

[Petty, 1994]

$$Q = 131,95 - 39,50 \ln(280 - T_{22V}) + 12,49 \ln(280 - T_{37V})$$

[Ruprecht, 1996]

$$Q = 88,76 + 43,289 \ln(290 - T_{19V}) - 62,217 \ln(290 - T_{22V})$$

[Wentz, 1995]

$$Q = 22,15 - 4,116 \ln(280 - T_{22V}) - 0,001777(T_{19V} - \ln(280 - T_{22V}))$$

$$Q = 23,82 - 4,059 \ln(280 - T_{22V}) + 0,02451(\ln(280 - T_{22V}) - T_{37V})$$

$$Q = 22,73 - 3,969 \ln(280 - T_{22V}) - 0,03423(T_{37V} - T_{86V}^{0,8})$$

[Schluessel, Emery, 1990]

$$Q = 20,75 - 2,582 \ln(280 - T_{19H}) - 0,3919 \ln(280 - T_{19V}) -$$

$$-3,610 \ln(280 - T_{22V}) + 2,729 \ln(280 - T_{37H}) - 0,5118 \ln(280 - T_{37V})$$

[Lojou, Bernard, Eymard, 1994]

$$Q = 232,894 - 0,149T_{19V} - 1,829T_{22V} - 0,370T_{37V} + 0,0062T_{22V}^2$$

[Alishouse et al., 1990]

$$Q = -3,753 + 1,507Q_A - 0,1933Q_A^2 + 0,00219Q_A^3$$

[Sun, Weng, 2008]

Метод последовательных приближений [Wentz, 1997; Sohn, Smith, 2003 и др.].

Основные типы и примеры современных спутниковых СВЧ-радиометров

Трассовые СВЧ радиометры (в поддержку радарной альтиметрии)

AMR (Jason-3, NASA); AMR-C (Sentinel-6, ESA); MW radiometer (SWOT, NASA); MWR (Sentinel-3A,B, ESA)

СВЧ-радиометры конического сканирования

AMSR-2 (GCOM-W1, JAXA); AMSR-3 (GOSAT-GW, JAXA, с 2023); COWVR (ISS, NASA); GMI (GPM Core Observatory, NASA); MADRAS (Megha-Tropiques, ISRO, до 2022); **MTB3A-ГЯ (Метеор-М №2-2,3,4, Роскосмос)**; MWRI (FY-3D, CMA, до 2022); MWRI (HY-2, NSOAS); SMAP (SMAP, NASA); SSMIS (DMSP F-17,-18, NASA, до 2022); TMS (TROPICS-1 Pathfinder, NASA)

СВЧ-радиометры поперечного сканирования

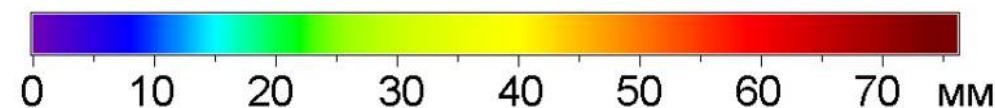
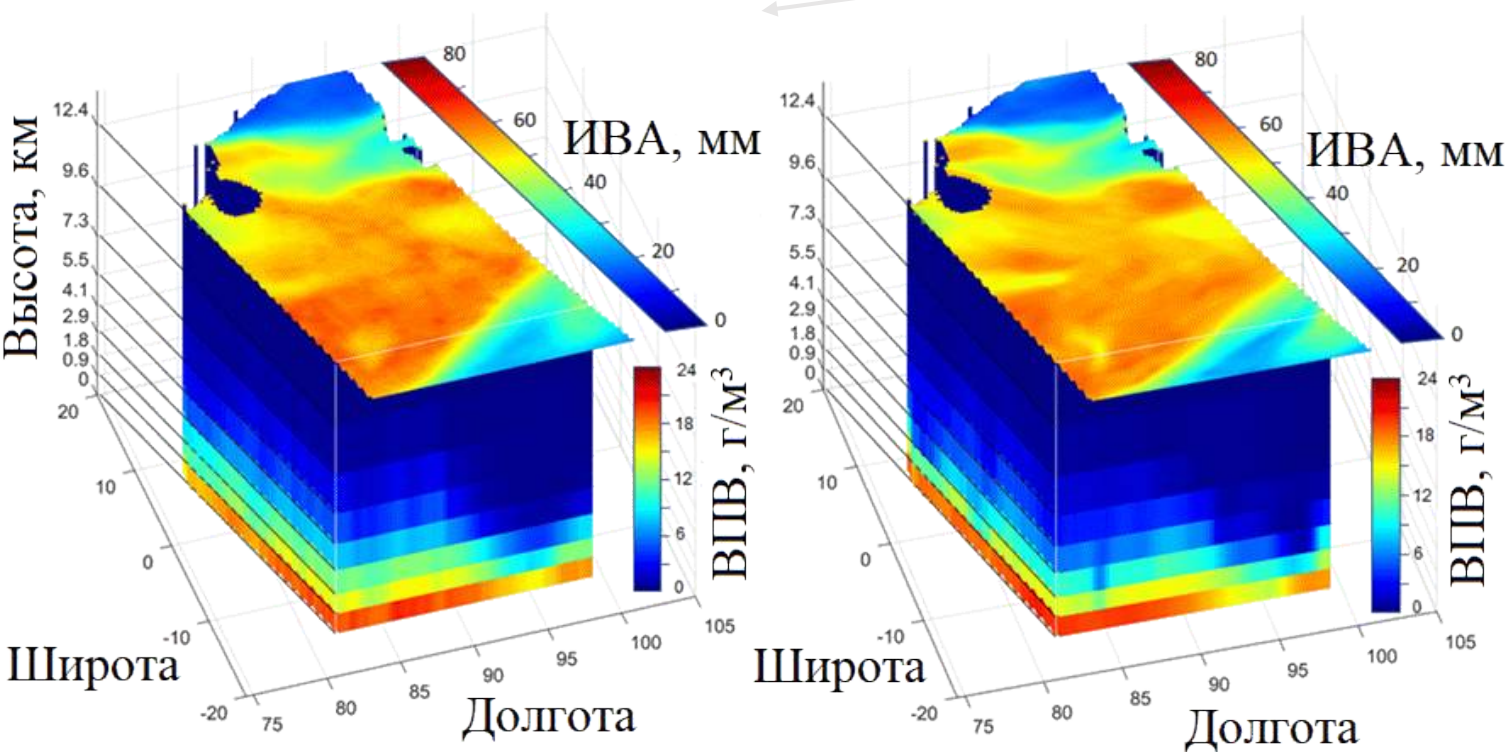
AMSU-A (Aqua, Metop-B,-C, NOAA-15,-18,-19, NOAA); AMSU-B (NOAA-15, UKSA); ATMS (SNPP, NOAA-20, NASA), MHS (Metop-B,-C, NOAA-18,-19, EUMETSAT); MM Radiometer (ISS, NASA); MWHS-2 (FY-3E, CMA); MWTS-3 (FY-3E, CMA); SAPHIR (Megha-Tropiques, CNES, до 2022);

СВЧ-радиометры с апертурным синтезом

MIRAS (SMOS, ESA)

Пример использования данных МТВЗА-ГЯ на спутнике «Метеор М2-2»

ИКИ РАН
РКС
НИЦ «Планета»

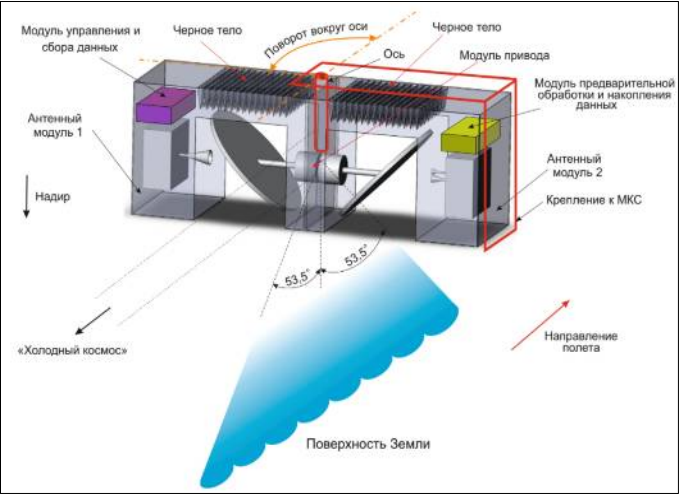


Вверху: интегральное влагосодержание и динамика атмосферы по водяному пару

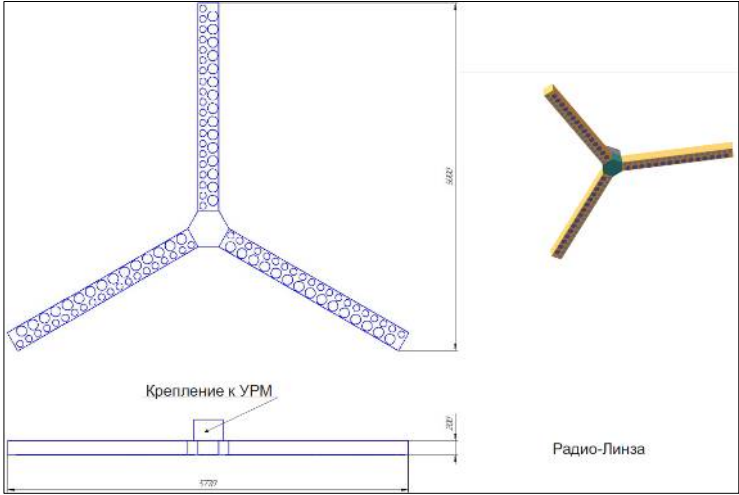
Внизу: трехмерное поле влажности по МТВЗА-ГЯ (слева) и реанализу ERA-5

ИВА – интегральное влагосодержание атмосферы
ВПВ – вертикальный профиль (абсолютной) влажности

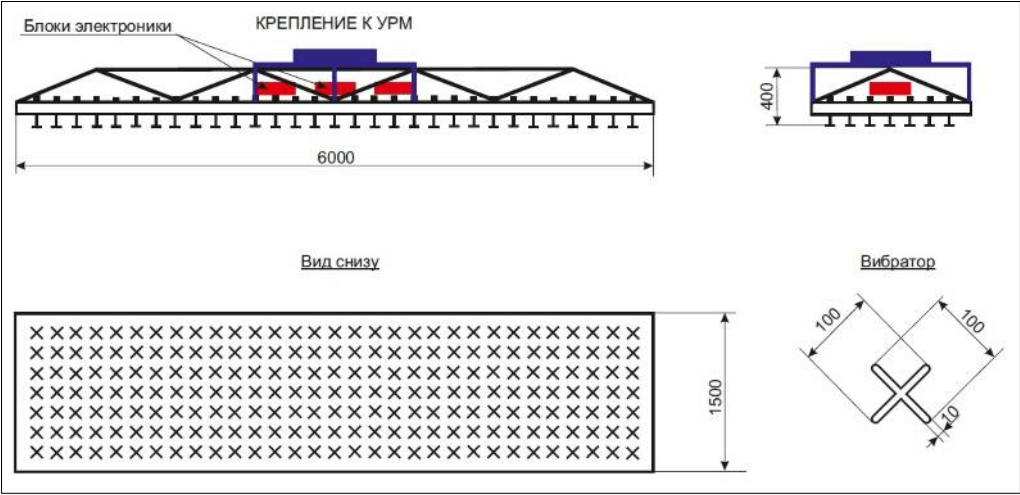
Концепция ИКИ РАН радиофизических экспериментов по ДЗЗ на РОС



«Конвергенция-М»:
радиотомография
атмосферы Земли



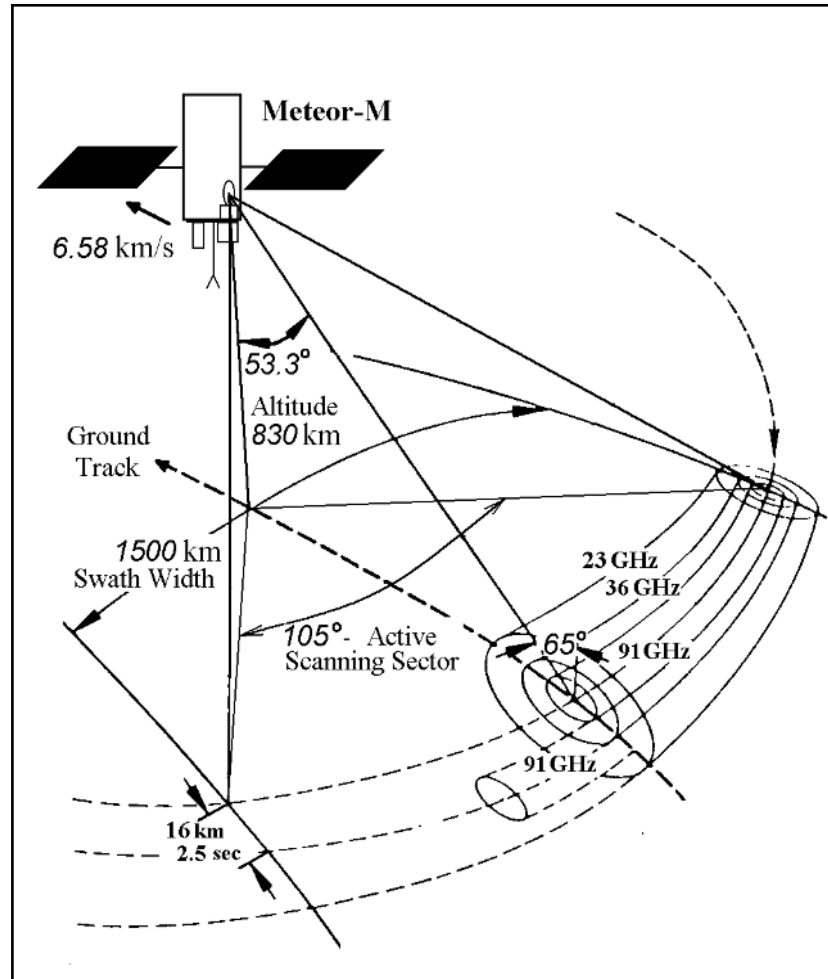
«Радио-линза»:
пассивный апертурный
синтез (две частоты)



«Криосфера»: радар с
синтезированной апертурой
S/L-диапазона (10 – 20 см)

Проект	ИД на ТЗ	(Включая ТЭЭ)	Заключение о ТР
Радио-Линза	согласованы	согласованы	получено
Конвергенция-М	согласованы	согласованы	получено
Криосфера	на согласовании	на согласовании	получено

Проблемы развития элементной базы

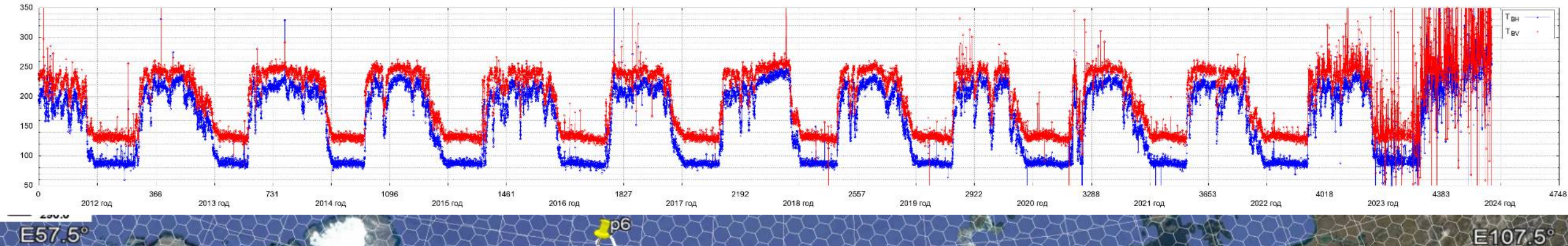


Частота, ГГц	Поле зрения, км × км	Размер пикселя, км × км
6.9	133 x 297	32 x 32
10.6	89 x 198	32 x 32
18.7	52 x 116	32 x 32
23.8	42 x 94	32 x 32
31.5	35 x 76	32 x 32
36.5	30 x 67	32 x 32
42.0	26 x 60	32 x 32
48.0	24 x 43	32 x 32
91.65	14 x 30	16 x 16
52.80/V (O1)	198	32 x 32
53.30/V (O2)	116	Водяной пар
53.80/V (O3)	94	
54.64/V (O4)	76	
55.63/V (O5)	67	
$\nu_0 \pm 0.1/\text{H}$ (O6)	60	
$\nu_0 \pm 0.05/\text{H}$ (O7)	43	183.31 ± 7.0/V (H1)
$\nu_0 \pm 0.025/\text{H}$ (O8)	30	
$\nu_0 \pm 0.01/\text{H}$ (O9)		
$\nu_0 \pm 0.005/\text{H}$ (O10)		
57,29±0,322 ГГц		

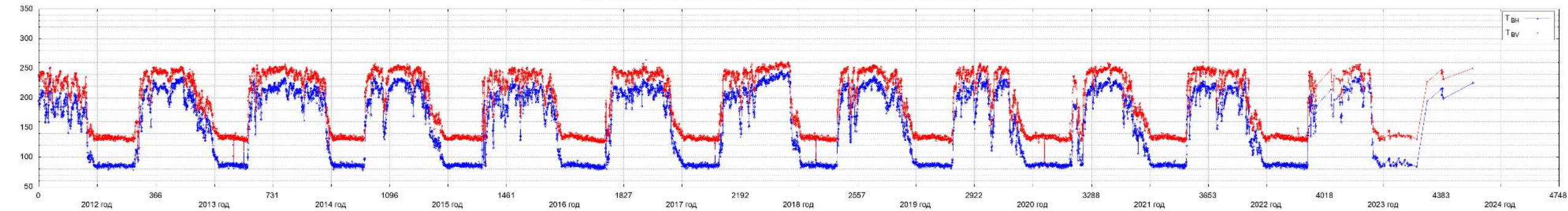
Развитие элементной базы для СВЧ-устройств – комплексная проблема, требующая эффективной межведомственной кооперации всех заинтересованных участников

Рост загрязненности радиодиапазона в Арктике

Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 4069515 (73,202 с.ш.; 73,202 в.д.)

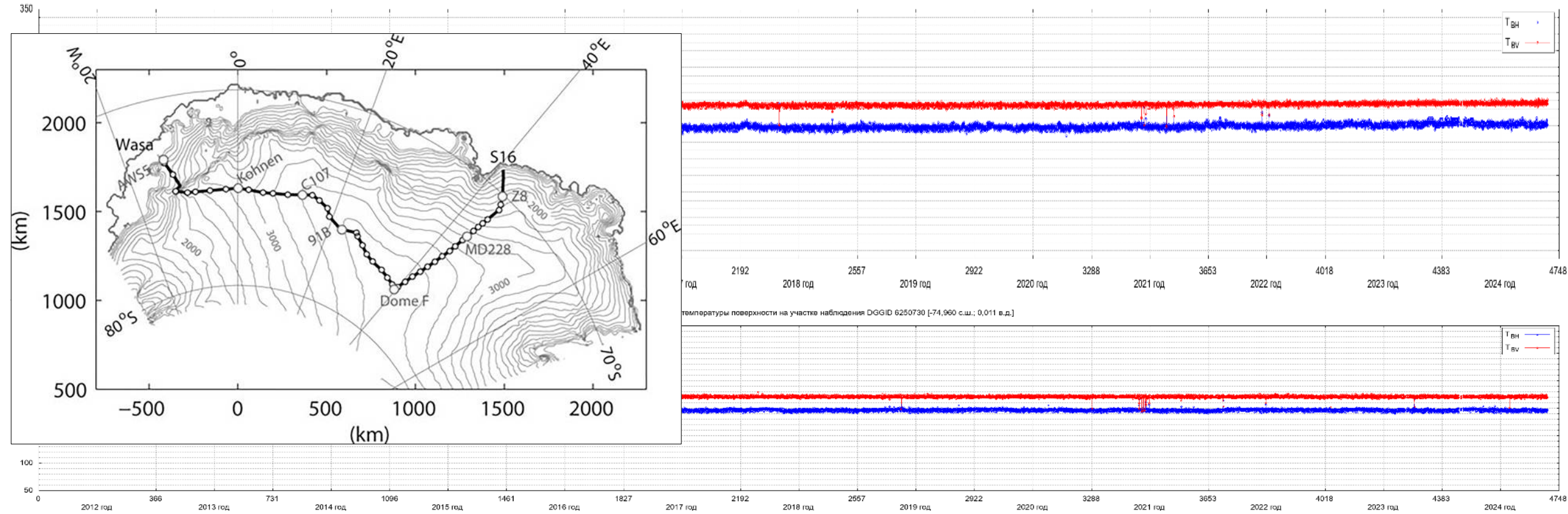


Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 4069515 (73,202 с.ш.; 73,202 в.д.)

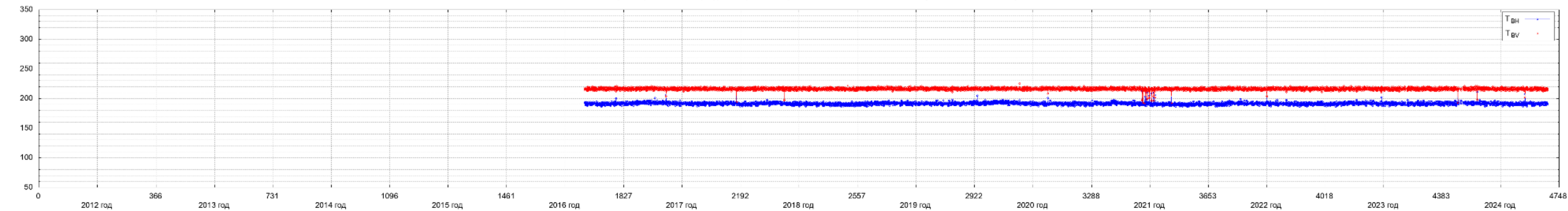


Шумовая/помеховая обстановка в Антарктиде

Динамика радиояркой температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 6234848 [-73,070 с.ш.; -12,953 в.д.]



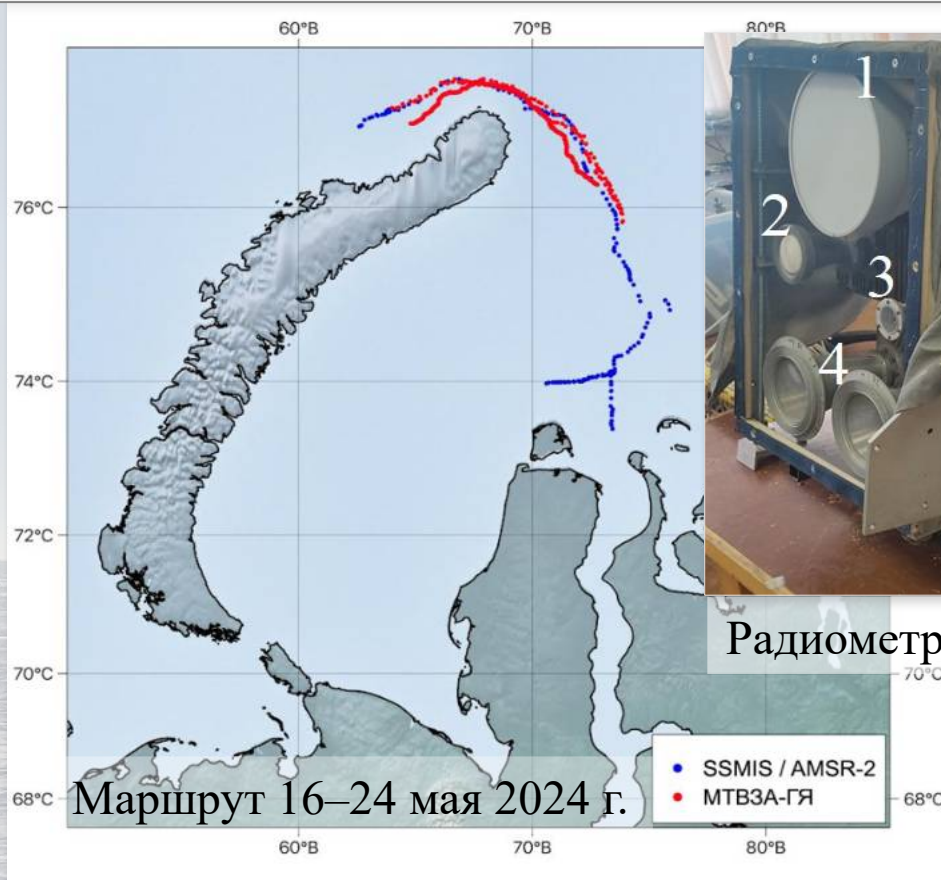
Динамика радиояркой температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 7076825 [-74,740 с.ш.; 22,841 в.д.]



Подспутниковый эксперимент ИКИ РАН с борта атомного ледокола «Ямал»



112 часов записей комплексных наблюдений морского льда с борта а/л «Ямал» прошло предварительную обработку и размещено в ЦКП «ИКИ-Мониторинг»



Радиометрический комплекс



Спасибо за внимание

