

Одиннадцатая Всероссийская научная школа-конференция по фундаментальным проблемам
дистанционного зондирования Земли из космоса
16 ноября 2015 , ИКИ РАН, Москва

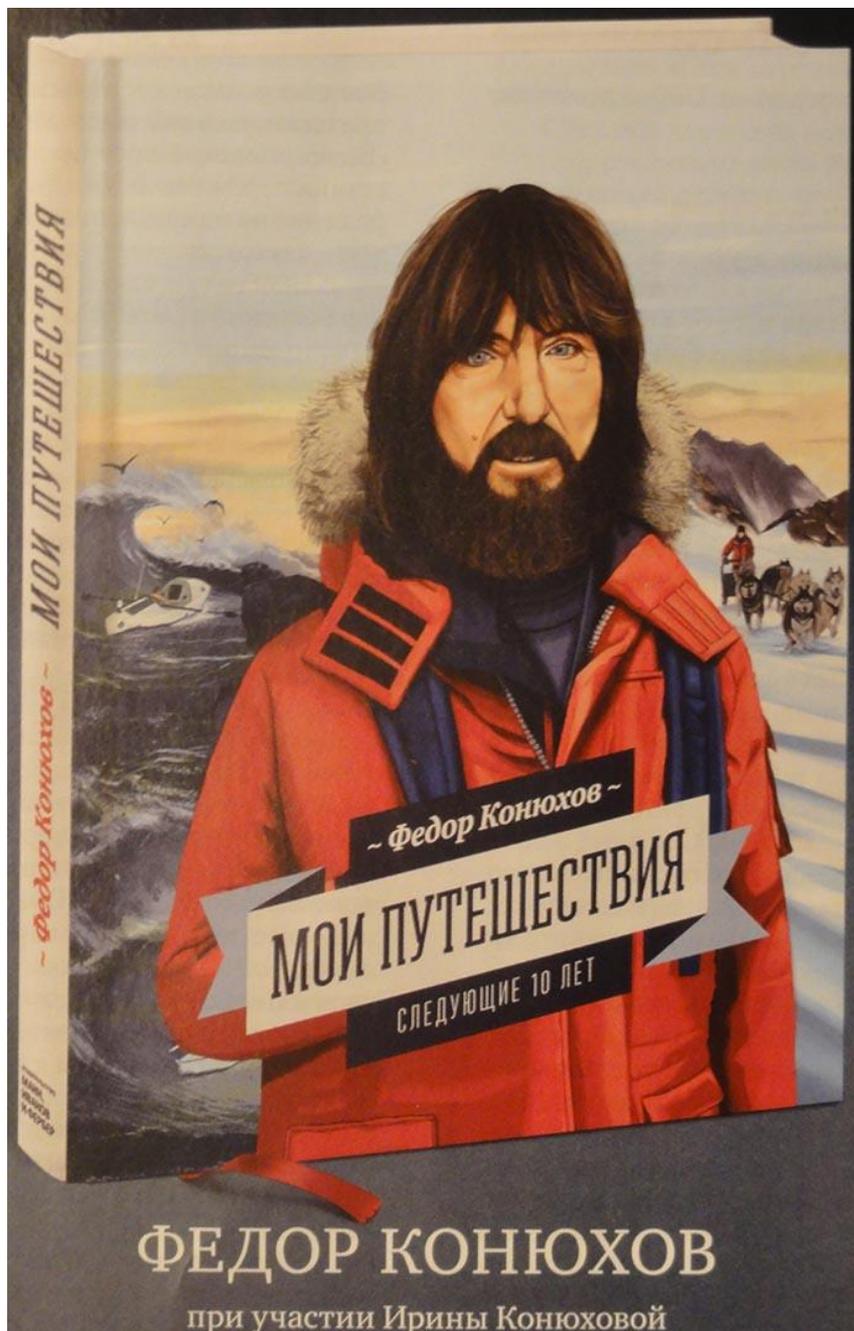
Антарктическое плато: спутниковое микроволновое зондирование поверхности, подповерхностных слоев, тропосферы и стратосферы

Митник Л.М.(1), Кулешов В.П.(2), Чёрный И.В.(2)

(1) Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

(2) НТЦ "Космонит" ОАО "Российские космические системы»





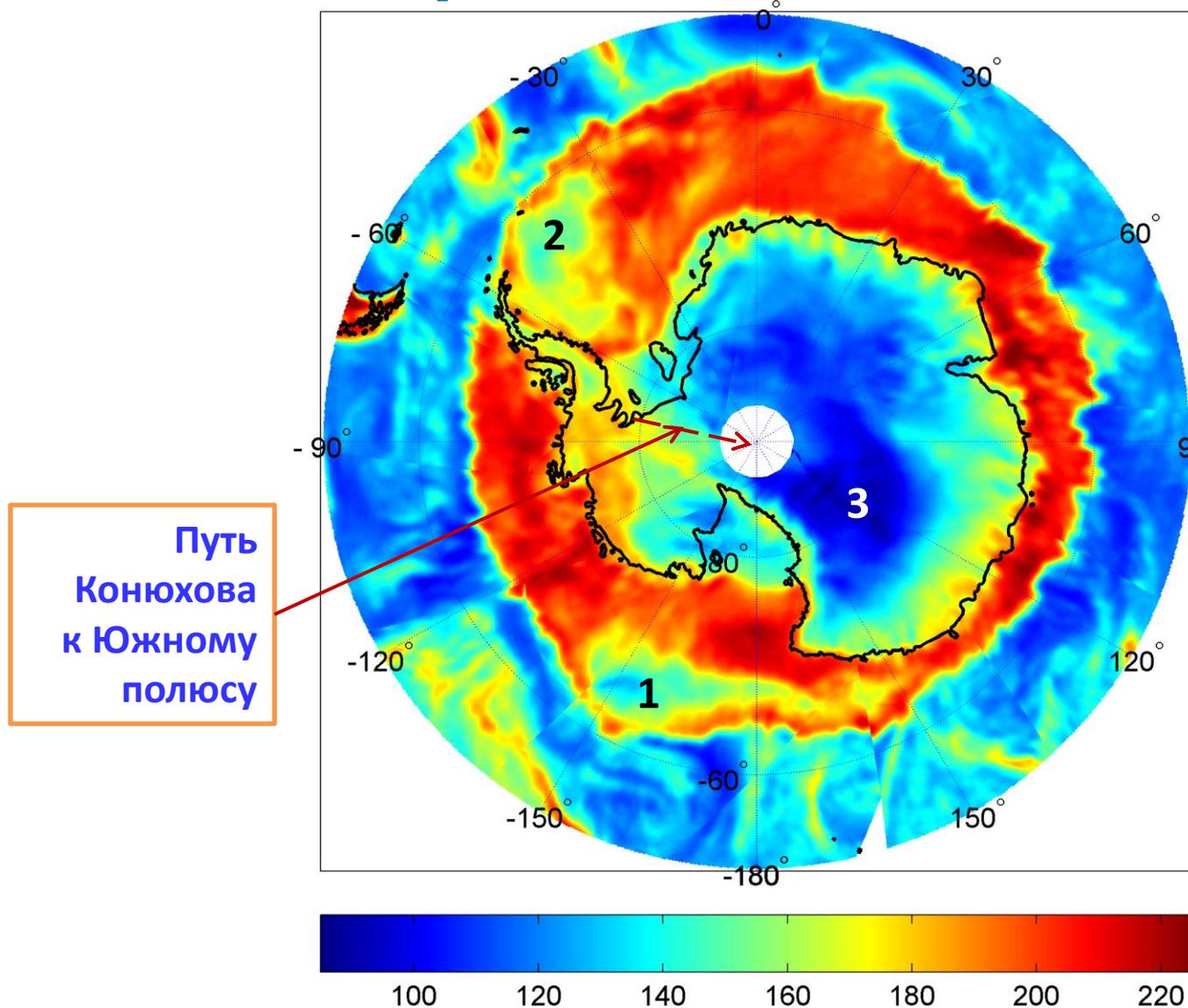
8 ноября 1995 г. Федор Конюхов
стартовал от бухты Геркулес
79°58'03" ю.ш., 80°07'31" з.д.
до Южного полюса. Более 1100 км.

16 ноября.
80°41'43", 80°11'40"
"Ветер сильный, встречный.
Большие заструги. Скользящий
Снег и все время в гору".

5 января 1996 г.
Южный полюс. 90°00'00", Н = 2800 м.
Металлический флагшток высотой 2 м.
Каждые 2-3 года – новая вешка.
За год ледник смещается на 20-30 м.
В 300 м от полюса – *Площадь наций.*

В 3 км от полюса – *станция Амундсен-Скотт.*

Антарктическое плато



Антарктида, окружающий её морской лед и циклонические образования по измерениям радиометра **МТВЗА-ГЯ** на частоте 36.7 ГГц на горизонт. поляризации 27 августа 2014 со спутника **Метеор-М № 2**, запущенного 8 июля 2014 г.

Шельфовые ледники Росса **1** и Уэдделла **2** характеризуются низкими T_b . Самые низкие T_b – в области Антарктического плато **3**.

SPT – South Pole Telescope

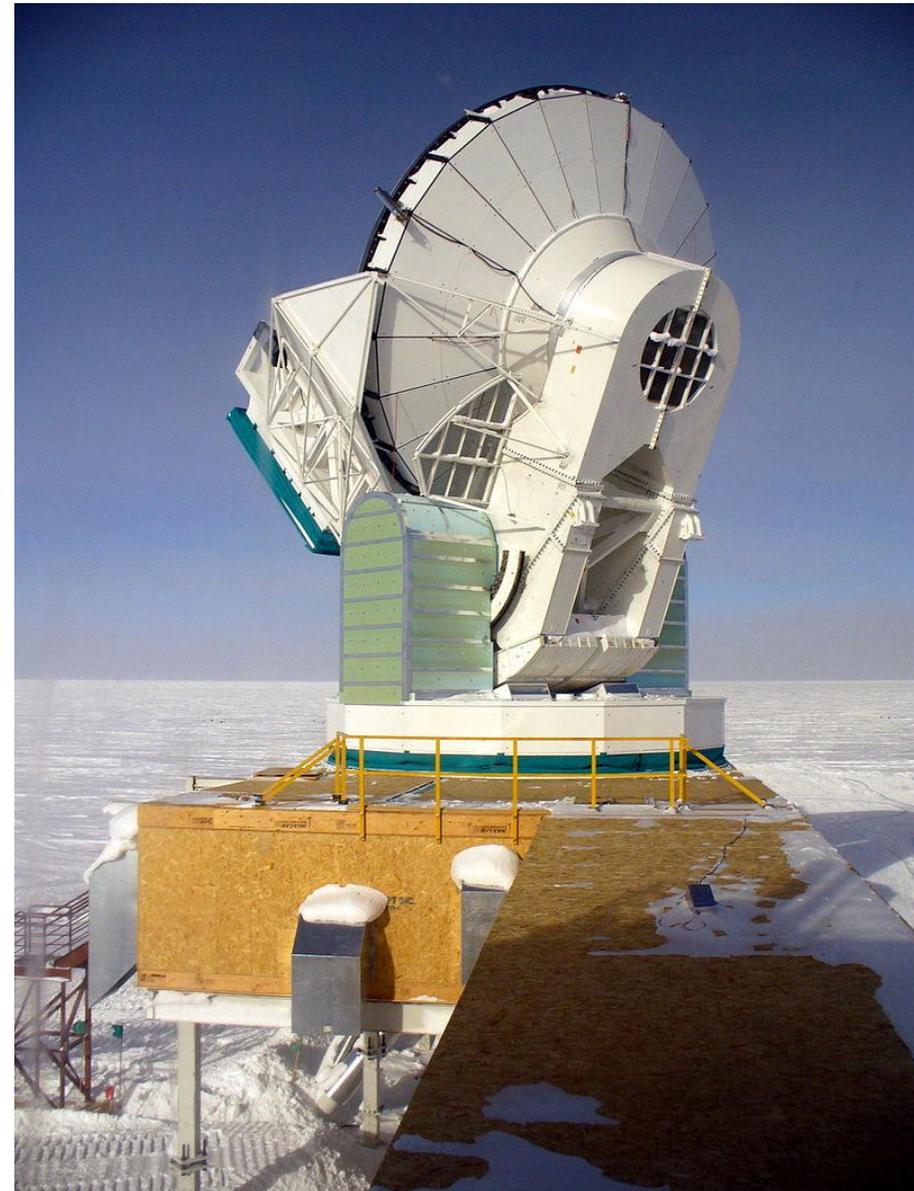
Измерения ведутся на частотах 95 , 150 и 220 ГГц с помощью SPT-SZ камеры.

SZ – в честь *Сюняева-Зельдовича*, так как камера была построена для обзора кластеров галактик через их SZ сигнатуры.

Эффéкт *Сюняева — Зельдóвича* — изменение интенсивности радиоизлучения реликтового фона из-за обратного эффекта Комптона на горячих электронах межзвёздного и межгалактического газа. Эффект назван в честь предсказавших его в 1969 году учёных Р. А. Сюняева и Я. Б. Зельдовича.

С помощью эффекта *Сюняева — Зельдовича* можно измерить диаметр скопления галактик, благодаря чему скопления галактик могут быть использованы в качестве стандартной линейки при построении шкалы расстояний во Вселенной.

Диаметр телескопа 10 м. Точность поверхности 25 мкм. Вторичное зеркало охлаждается до 10 К.



Содержание

1. Антарктическое плато
2. Геофизические и микроволновые характеристики Антарктического плато и области Dome-C
3. Радиометр МТВЗА-ГЯ на спутнике **Метеор-М № 2**
4. Выбор области для внешней калибровки.
5. Временные ряды измерений. Оценка стабильности работы радиометра в космосе
6. Выводы

- **Ледяной щит Антарктики и игрок в климатической системе Земли, и одновременно индикатор её изменений.**
- **Площадь щита 14106 км².**
- **В Антарктике примерно 90 % всей массы льда на Земле.**
- **Количество автоматических станций погоды около 100.**

Станции в Антарктиде

БЕЛЬГИЯ



БРИТАНИЯ



ФРАНЦИЯ И ИТАЛИЯ



ЮАР



США



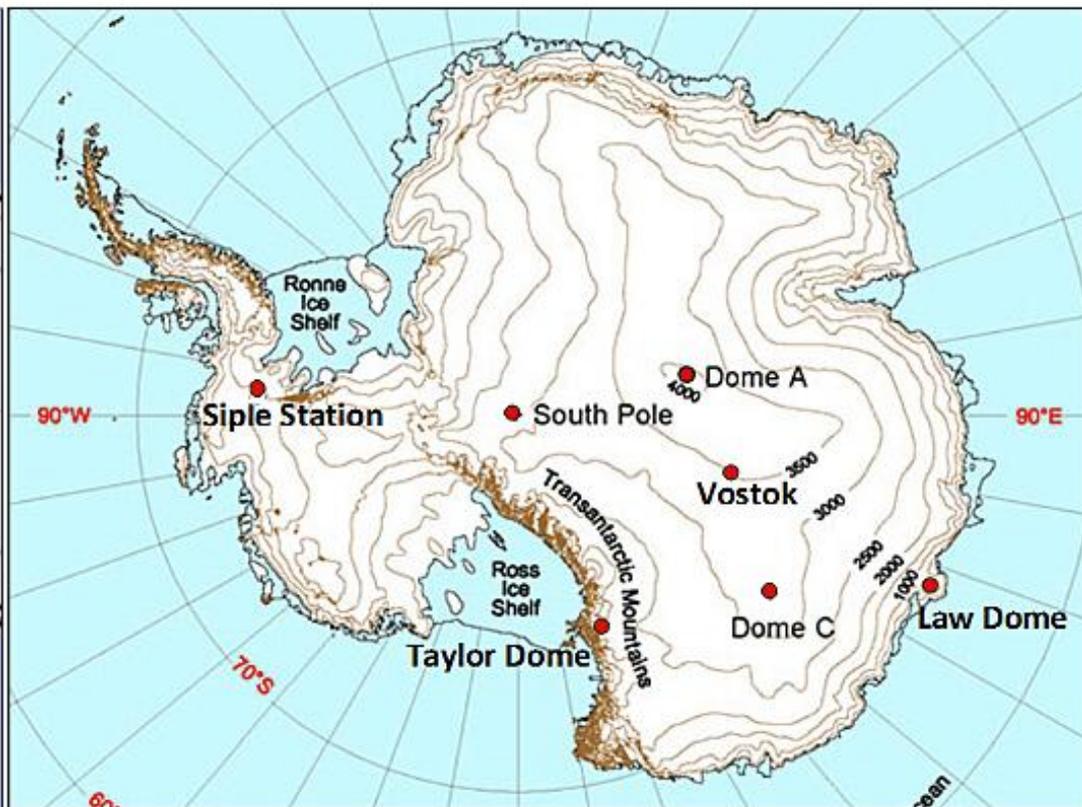
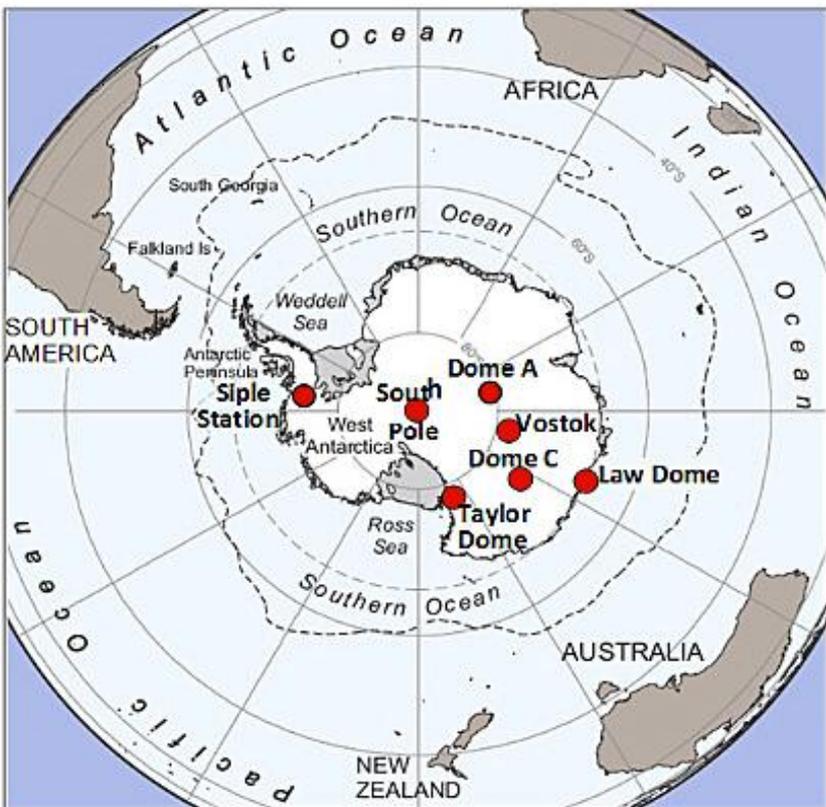
ГЕРМАНИЯ



РОССИЯ



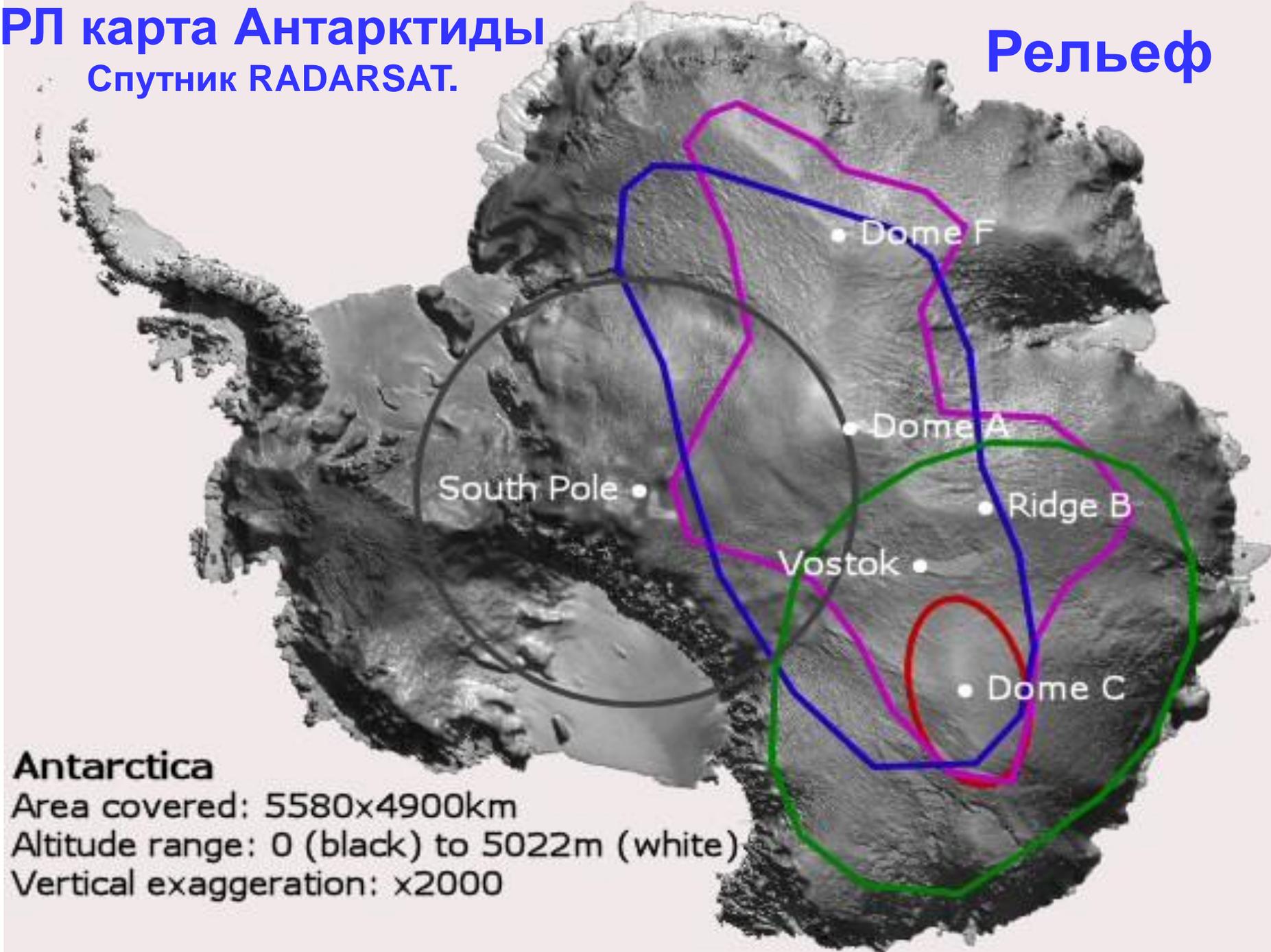
Франко-итальянская станция Concordia



РЛ карта Антарктиды

Спутник RADARSAT.

Рельеф



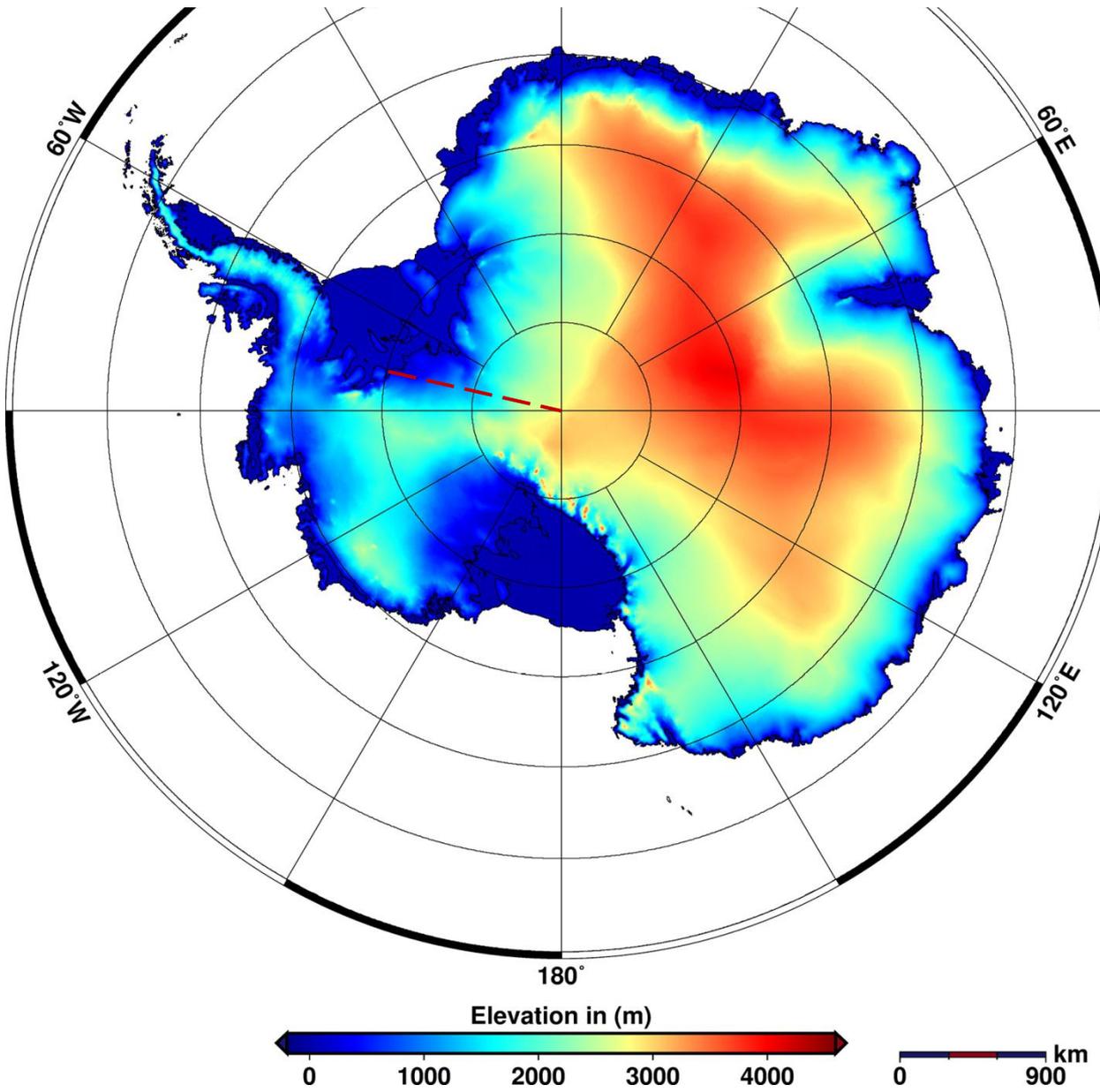
Antarctica

Area covered: 5580x4900km

Altitude range: 0 (black) to 5022m (white)

Vertical exaggeration: x2000

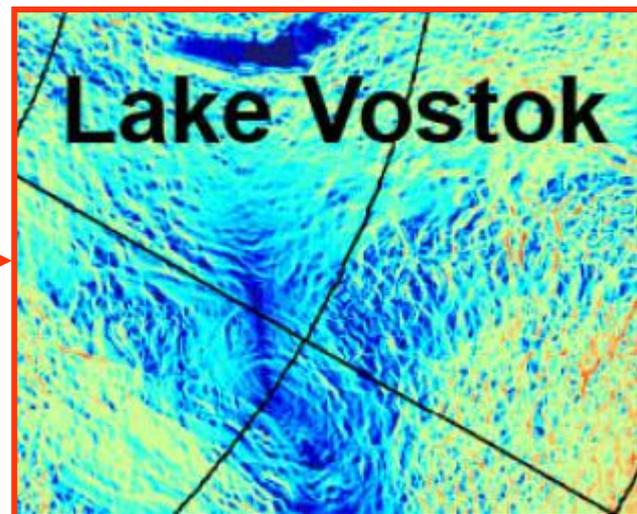
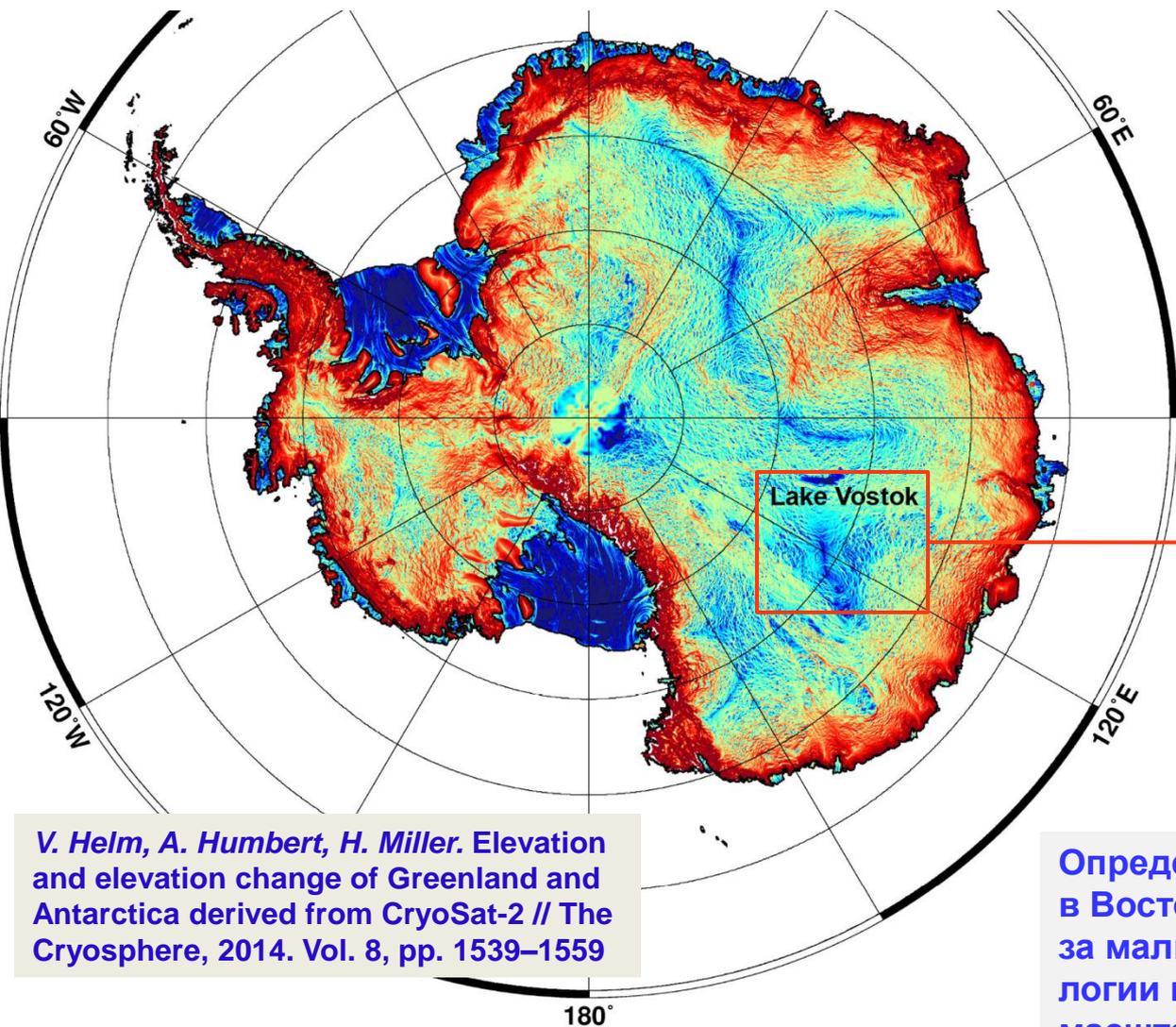
Новая модель рельефа Антарктики по данным CryoSat-2.



CryoSat-2 - спутник ESA для измерения толщины и площади ледяного покрова Антарктиды, Гренландии, Исландии, морских льдов, а также горных ледников при помощи высокоточного альтиметра. Спутник отслеживает динамику изменения ледников и влияние на них глобального потепления. **Программа ESA "Living Planet"**

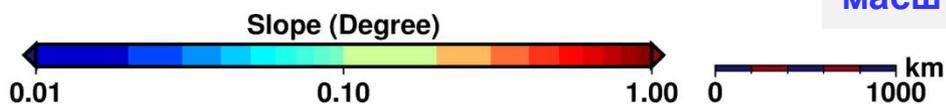
V. Helm, A. Humbert, and H. Miller
Elevation and elevation change of
Greenland and Antarctica derived
from **CryoSat-2** // *The Cryosphere*.
2014. Vol. 8, pp. 1539–1559

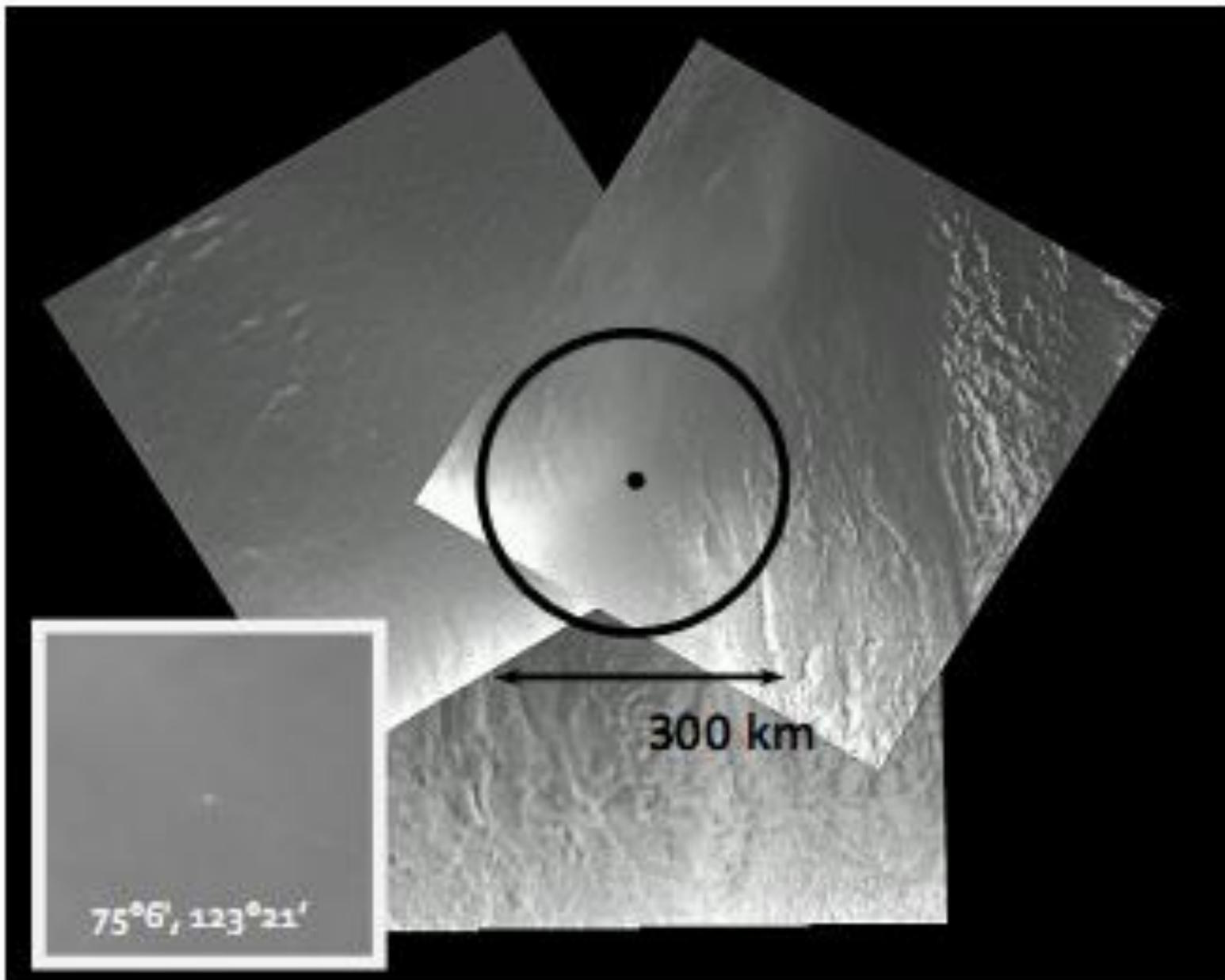
Карта наклонов поверхности, найденная по новой модели рельефа Антарктики



V. Helm, A. Humbert, H. Miller. Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2 // The Cryosphere, 2014. Vol. 8, pp. 1539–1559

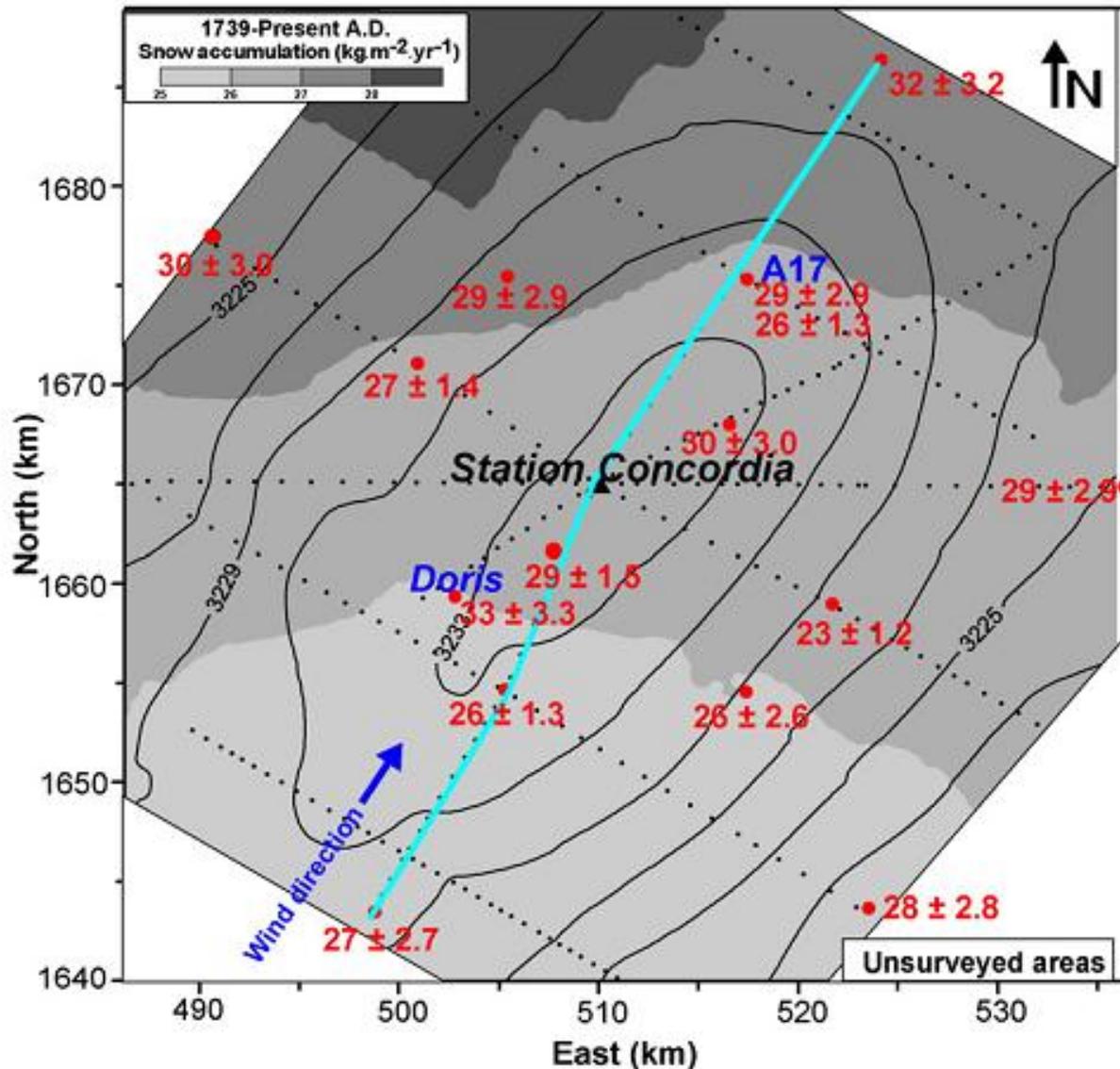
Определение положения центра купола в Восточной Антарктике затруднено из-за малых наклонов < 1 дм/км и морфологии поверхности (заструги, барханы) масштаба метра





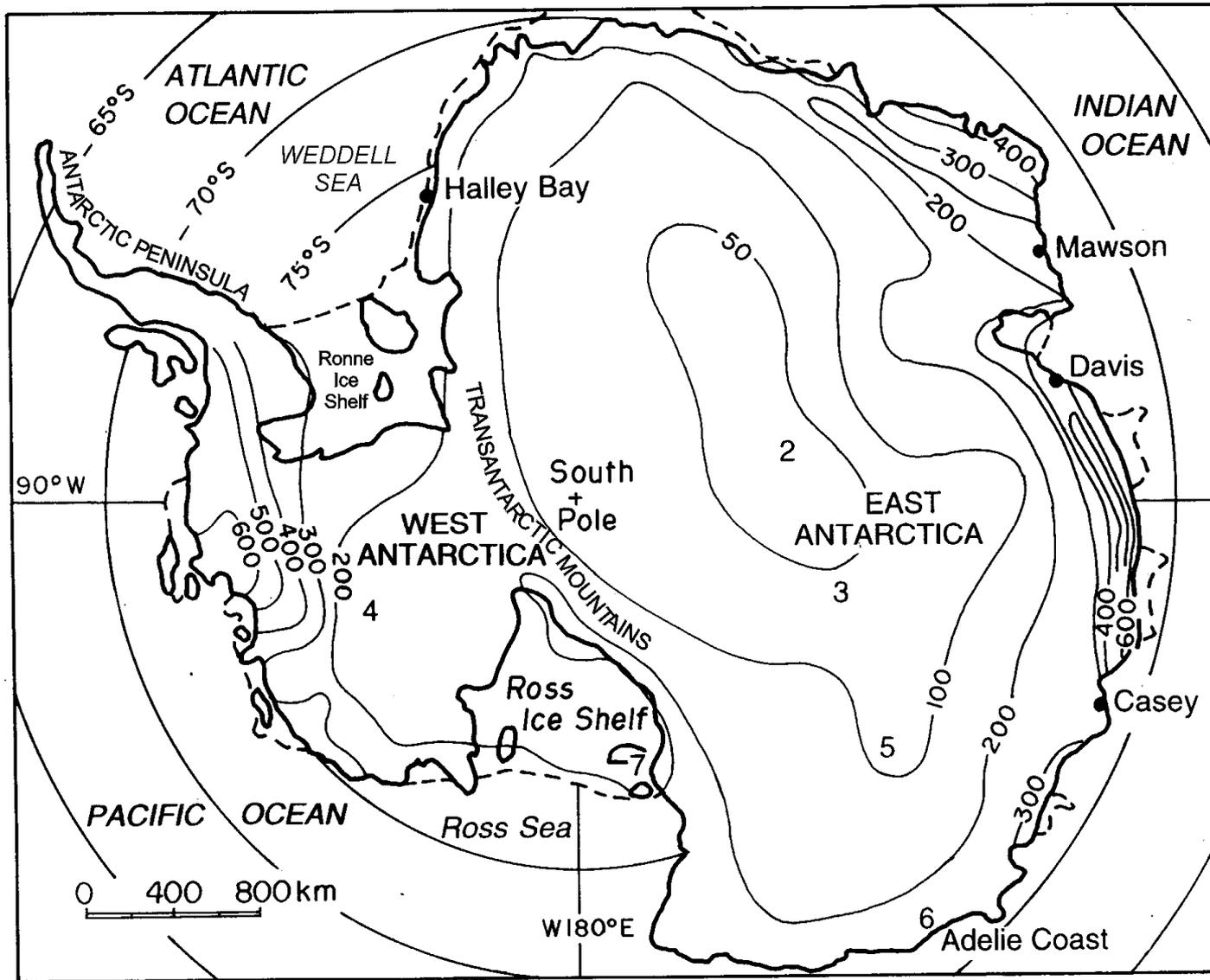
Модель рассеяния была получена для области соизмеримой с шириной полосы обзора RADARSAT-2 в режиме fine swath 50 км

Аккумуляция снега в Dome C ($\text{кг м}^{-2} \text{год}^{-1}$)



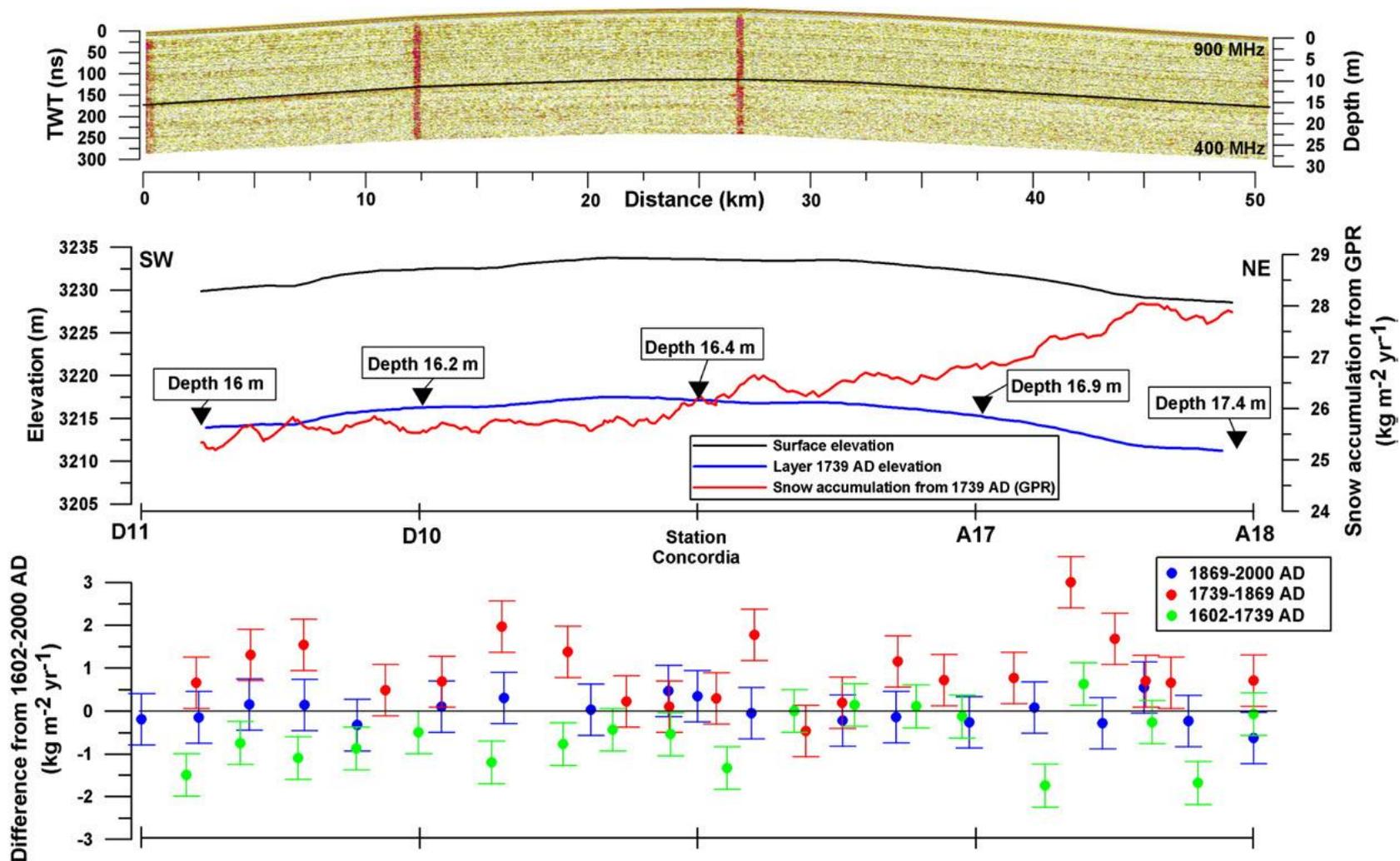
Красные цифры - скорость аккумуляции снега из анализа керна. Маркер - тритий за 1965–2000 гг. **Контурные линии** – топография с шагом 2 м. **Пунктирные линии** положение РЛ-профилей.

Urbini et al., Global and Planetary Change. 2008.



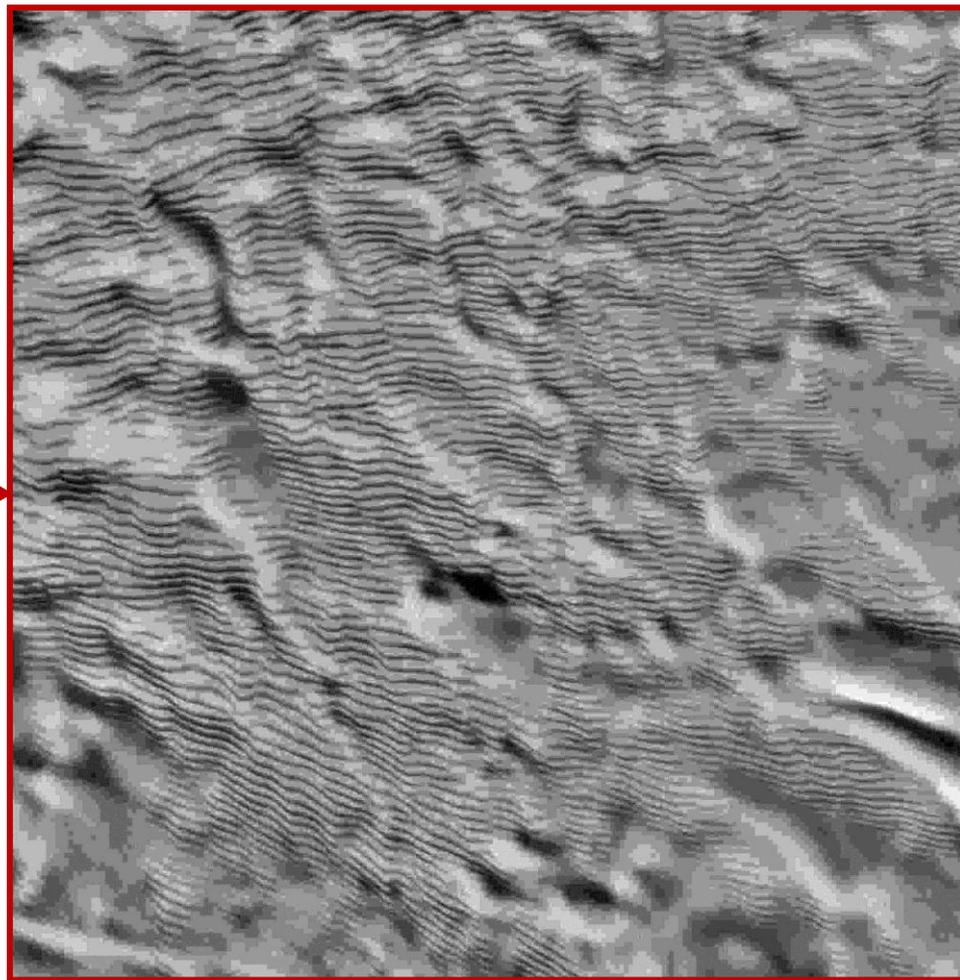
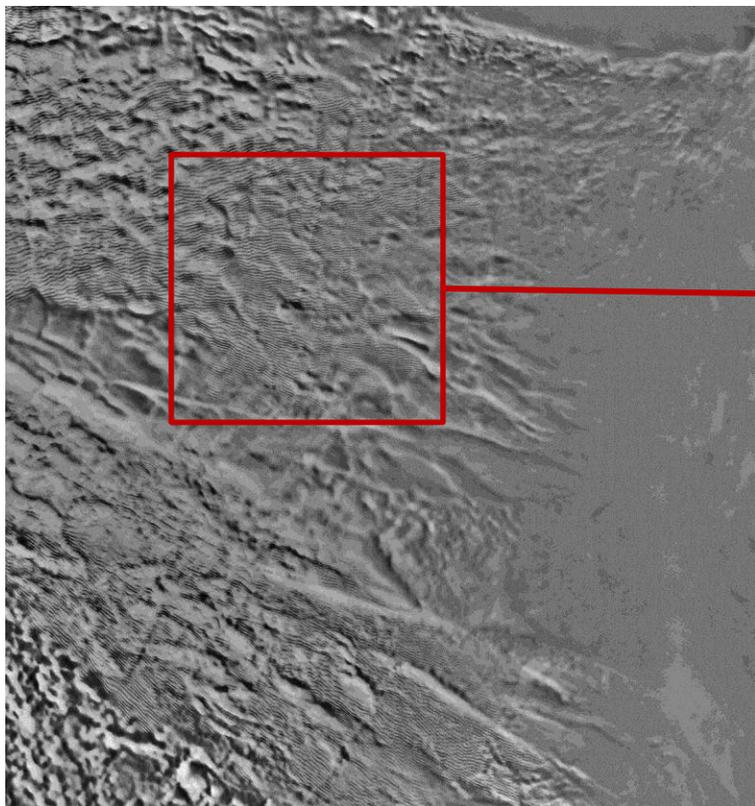
Осадки, мм/год

Schwerdtfeger 1979 p63
after Budd et al 1971



РЛ профиль с ЮЗ на СВ вдоль главной оси Dome C (см. предыдущий слайд). Числа указывают глубину слоя относительно 1739 г. и среднюю за 290 лет скорость аккумуляции снега по данным Ground Penetration Radar (GPR). Показаны разности в скорости аккумуляции и ошибки их оценки для трех различных периодов по данным GPR.

Ледяные волны на поверхности плато



PCA RADARSAT

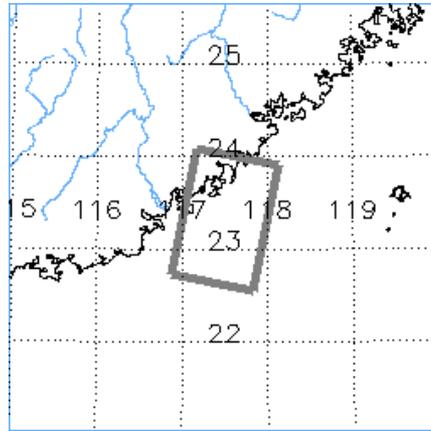
Песчаные волны в Тайваньском прол.

Taiwan Banks

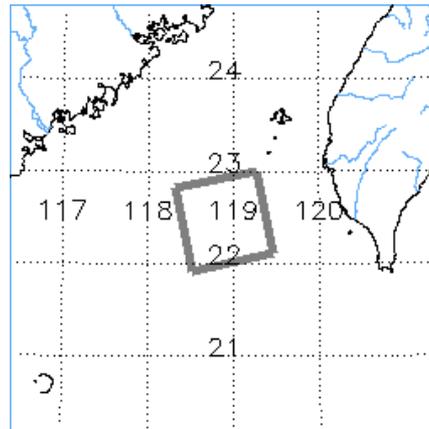
16 June 1999, 02:43 UTC

27 Jul 1994, 14:31 UTC

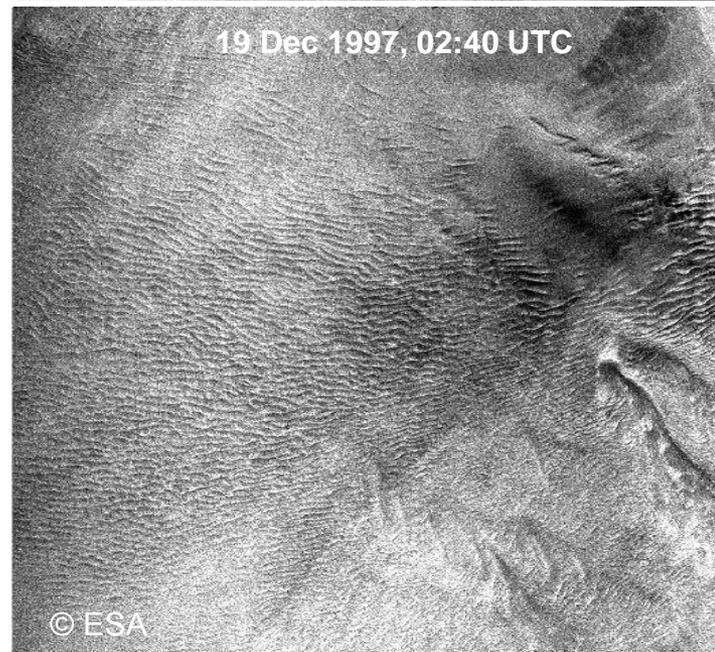
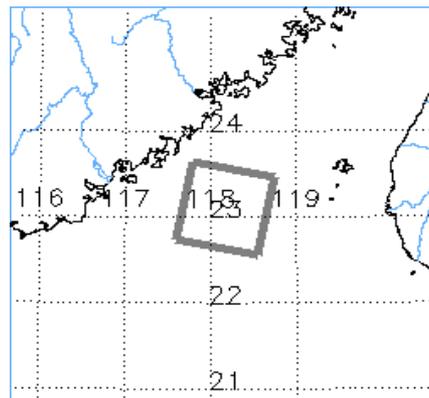
Китай



© ESA



19 Dec 1997, 02:40 UTC



© ESA

© ESA

ERS-2 SAR

Пустыня Сахара в Африке –
самая большая в мире. Сложные
линейные дюны длиной ≈ 6 км
(фото со Skylab)



Ripples on a dune in Eureka Valley, California (photograph by Terrence Moore).



Световой день на станции Concordia

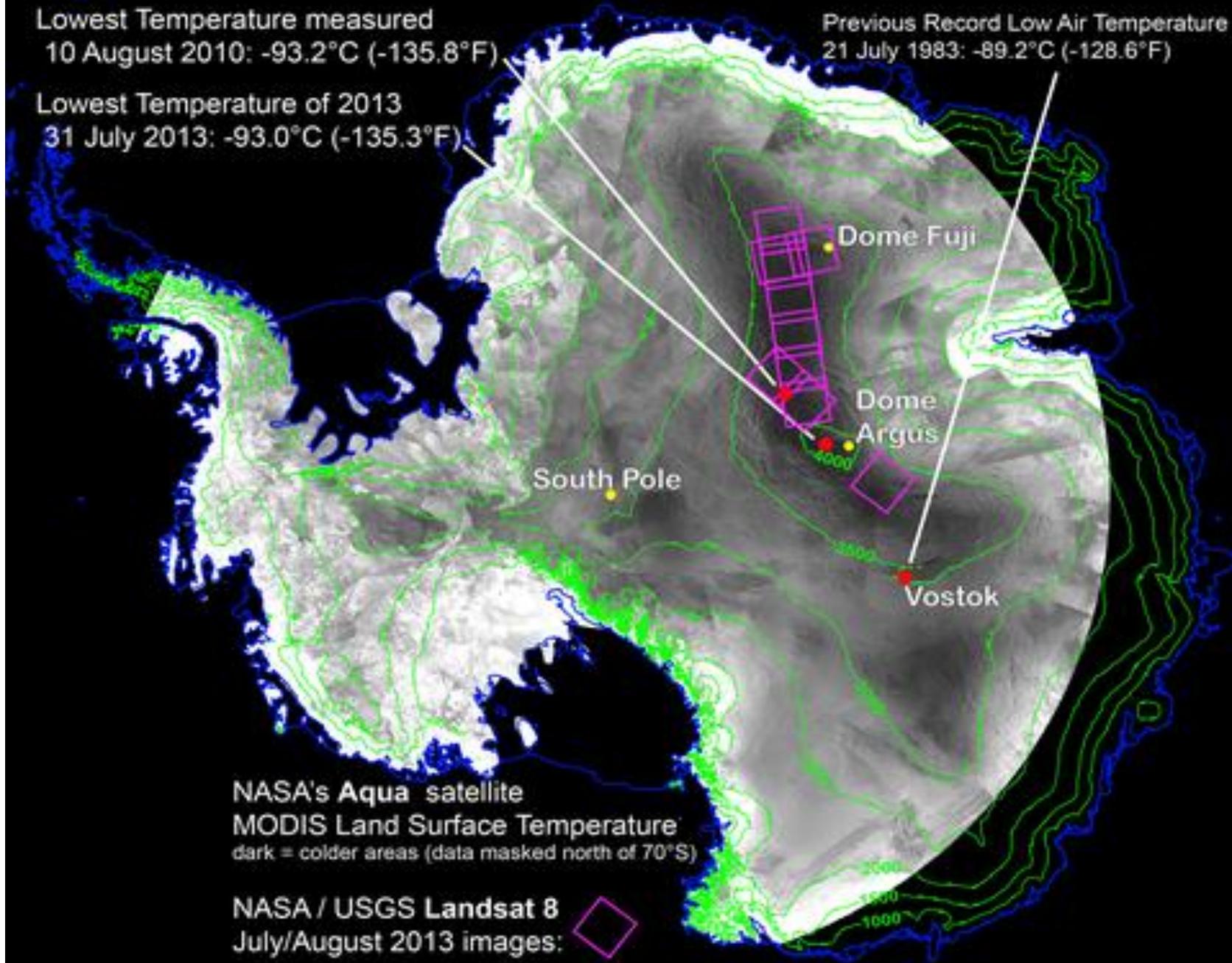
Дата	Восход	Заход	Световой день	Полуденная высота Солнца
22.06.2014	Полярная ночь		0ч 0м 0с	-8.5
22.07.2014	Полярная ночь		0ч 0м 0с	
22.08.2014	8:55	14:44	5ч 48м 53с	
22.09.2014	5:30	17:48	12ч 17м 20с	15
22.10.2014	2:01	21:01	19ч 0м 6с	
22.11.2014	Полярный день		24 часа	
22.12.2014	Полярный день		24 часа	38.5
22.01.2015	2:49	21:11	18ч 21м 45с	
22.02.2015	2:49	21:11	18ч 21м 45с	
22.03.2015	5:48	17:58	12ч 10м 2с	15
22.04.2015	8:59	14:31	5ч 32м 14с	
22.05.2015	Полярная ночь		0ч 0м 0с	
22.06.2015	Полярная ночь		0ч 0м 0с	

Температура

Lowest Temperature measured
10 August 2010: -93.2°C (-135.8°F)

Previous Record Low Air Temperature
21 July 1983: -89.2°C (-128.6°F)

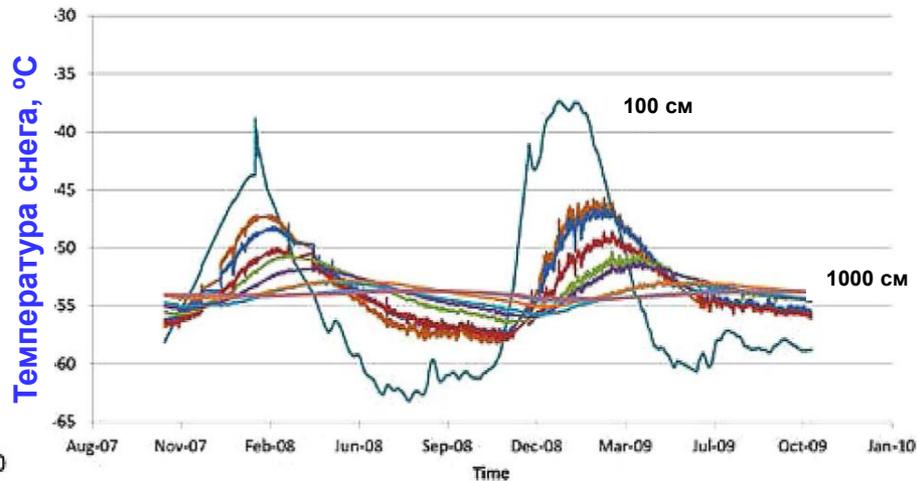
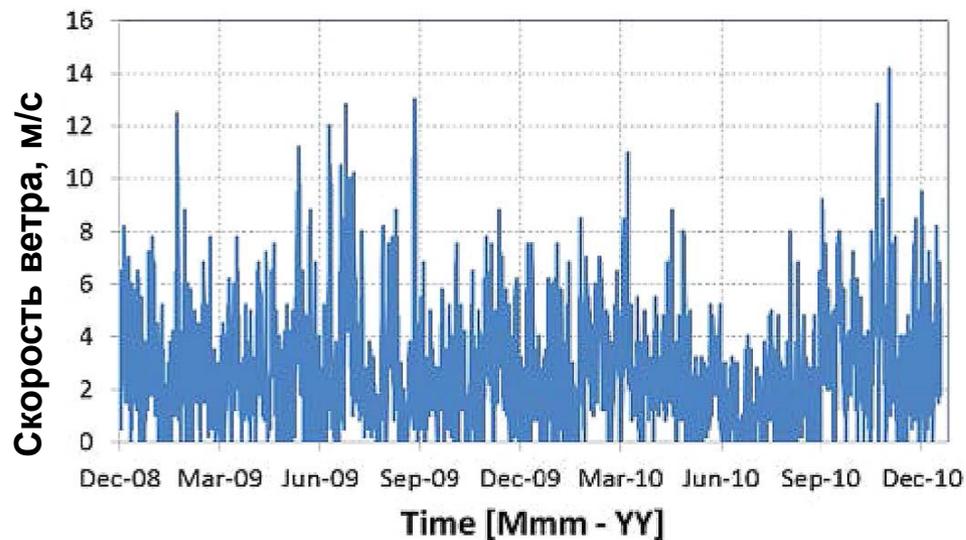
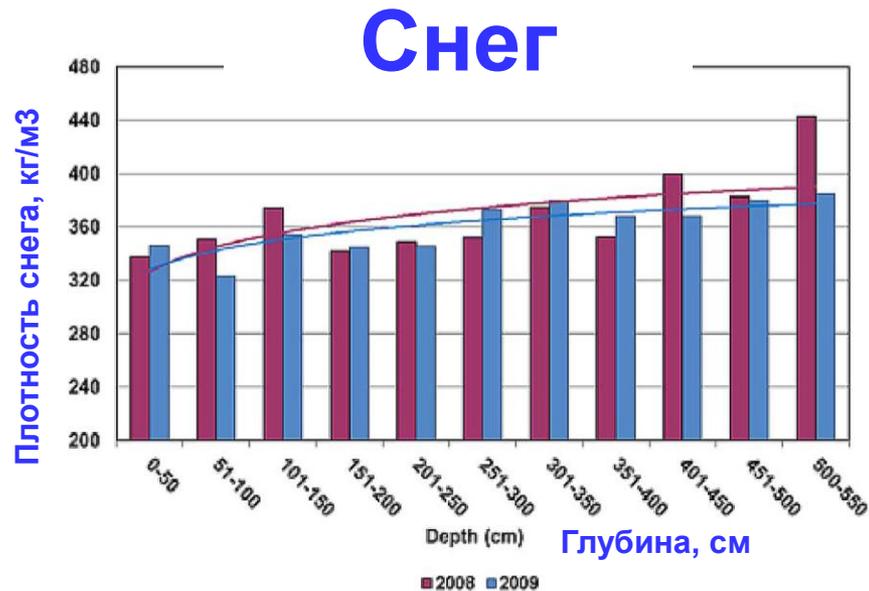
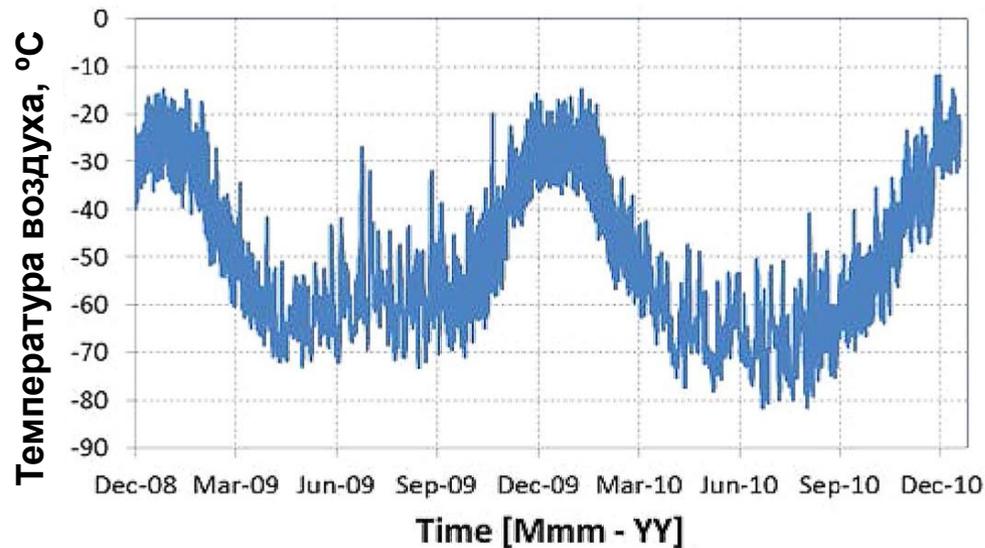
Lowest Temperature of 2013
31 July 2013: -93.0°C (-135.3°F)



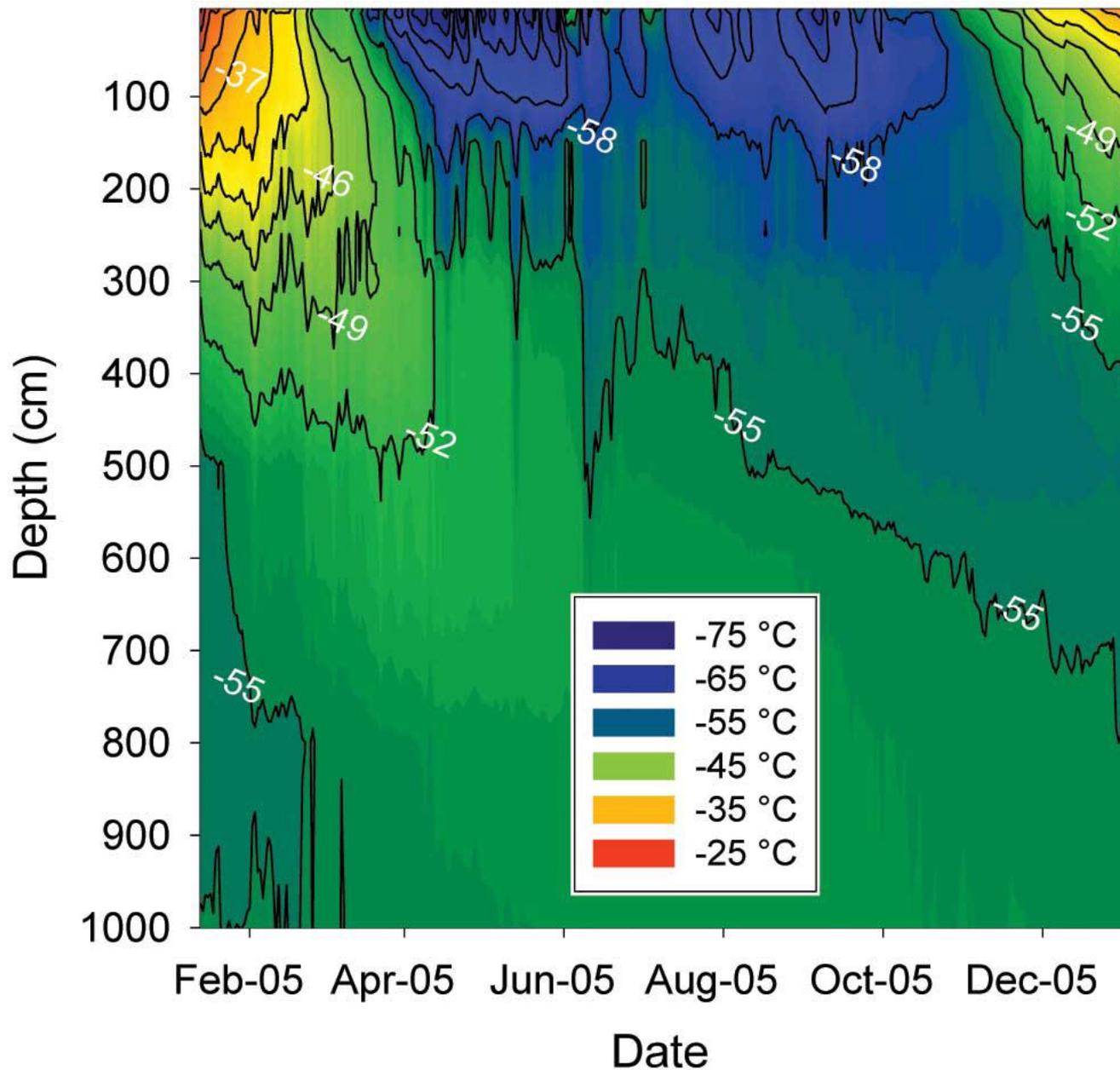
NASA's Aqua satellite
MODIS Land Surface Temperature
dark = colder areas (data masked north of 70°S)

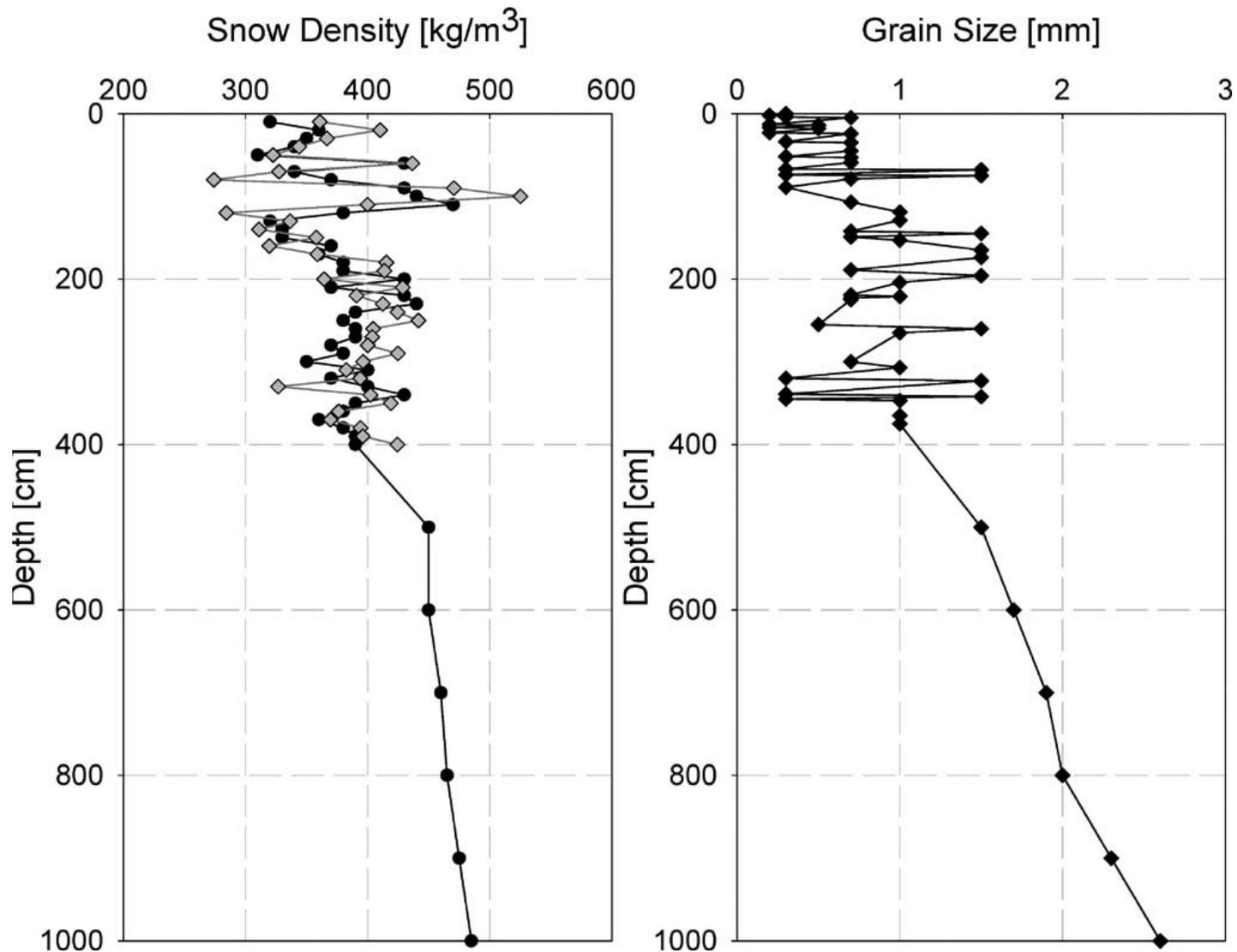
NASA / USGS Landsat 8
July/August 2013 images:





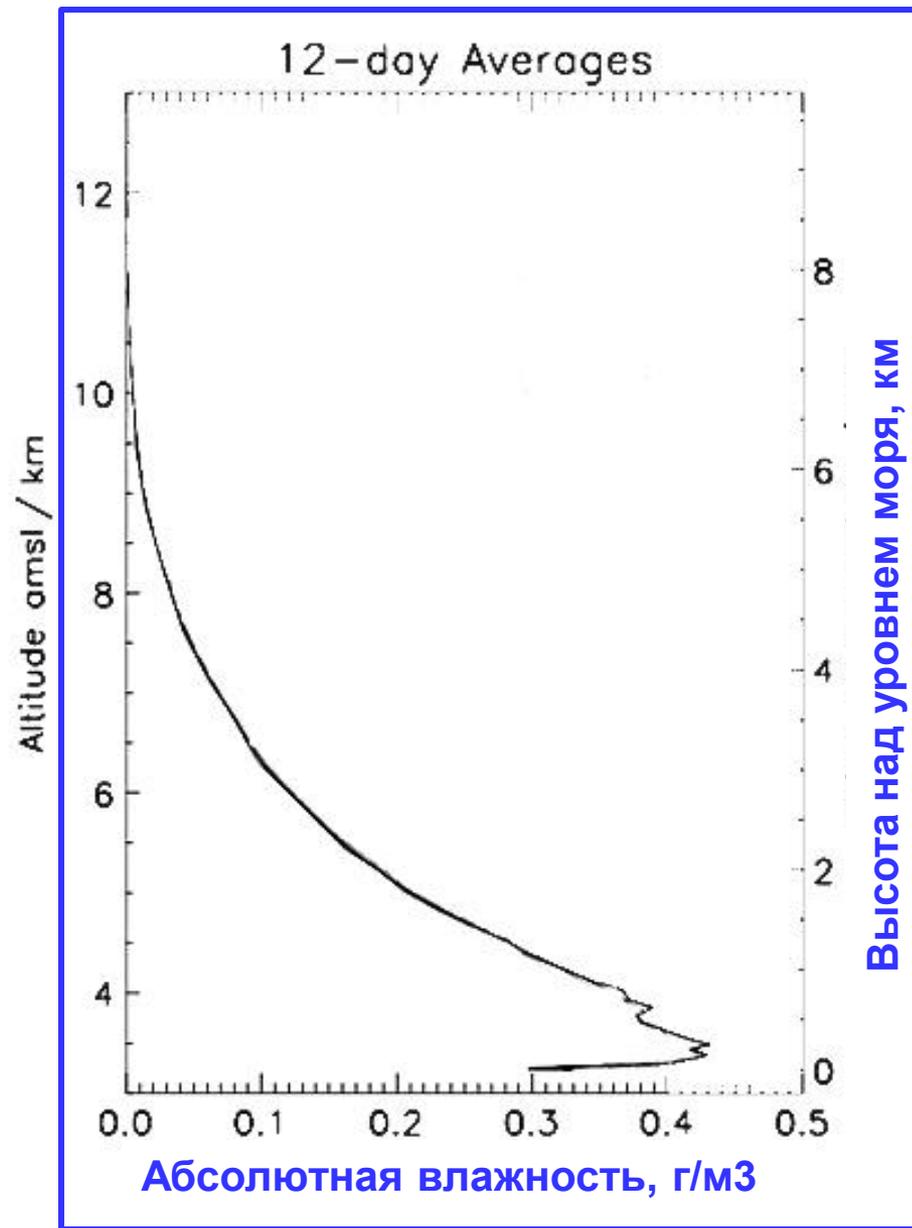
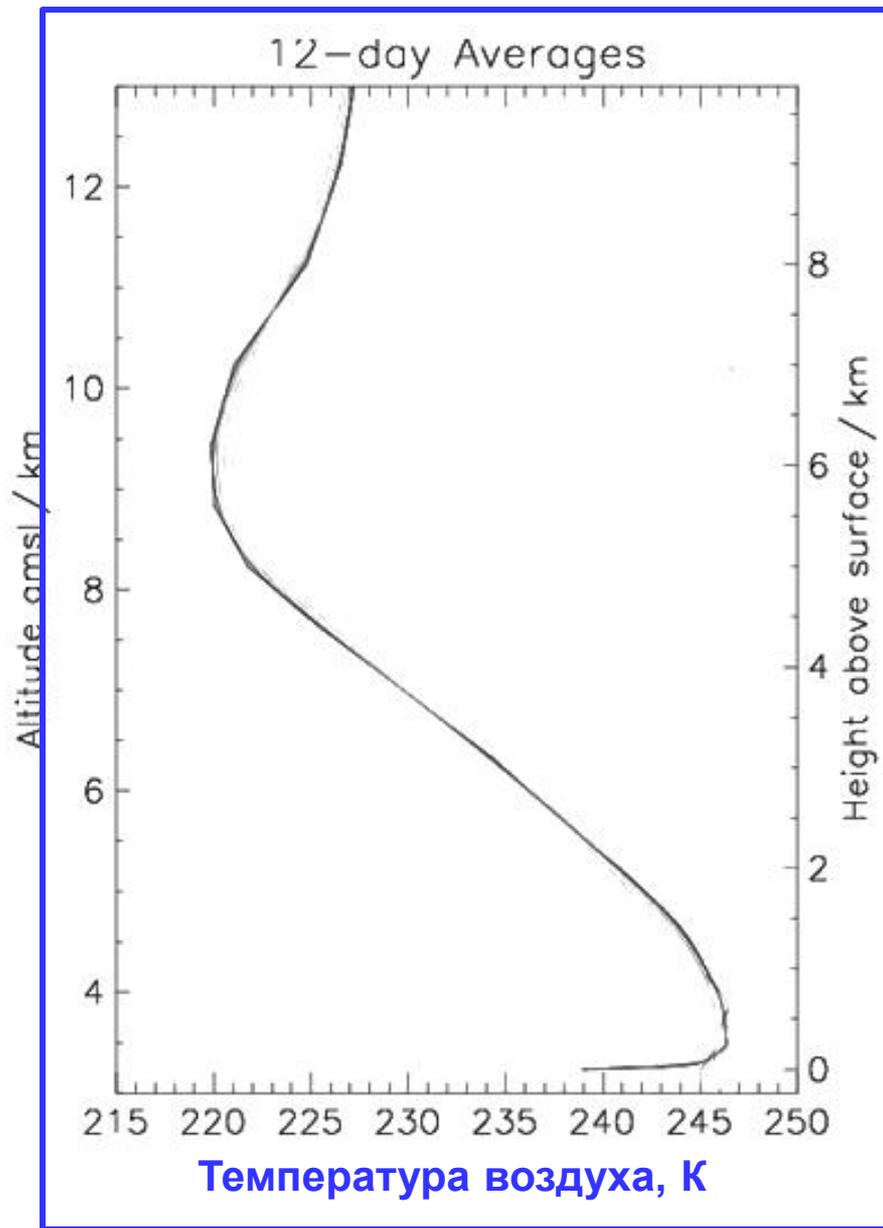
Температура снега в верхнем 10-м слое



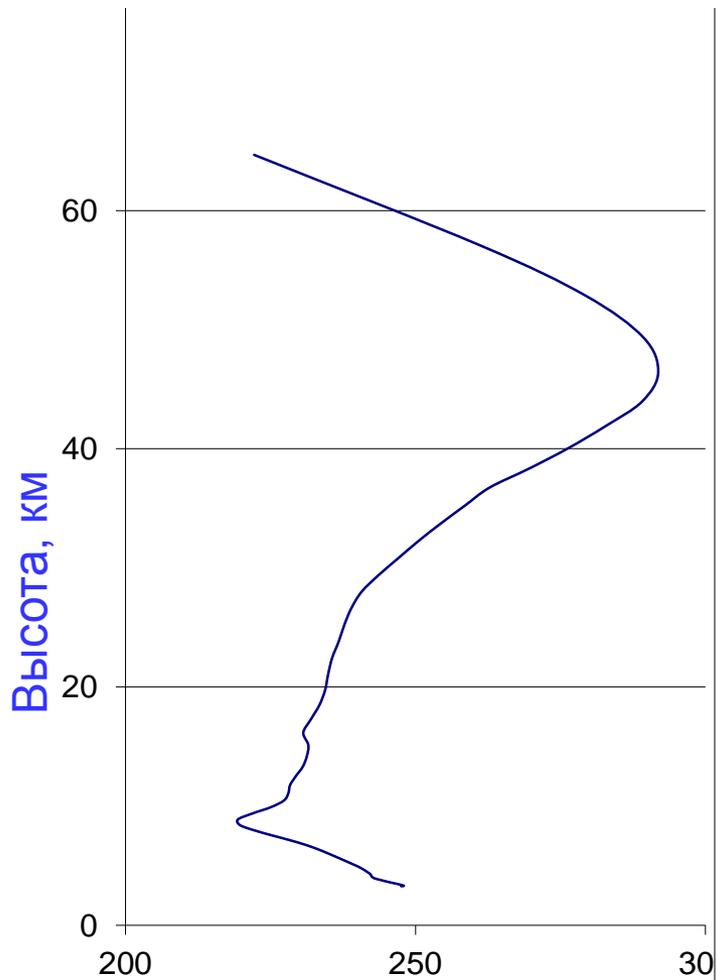


Средние значения плотности снега (слева) и размеры гранул (максимальный размер преобладающего количества гранул в каждом слое) (справа) в зависимости от глубины в верхнем 10 м слое

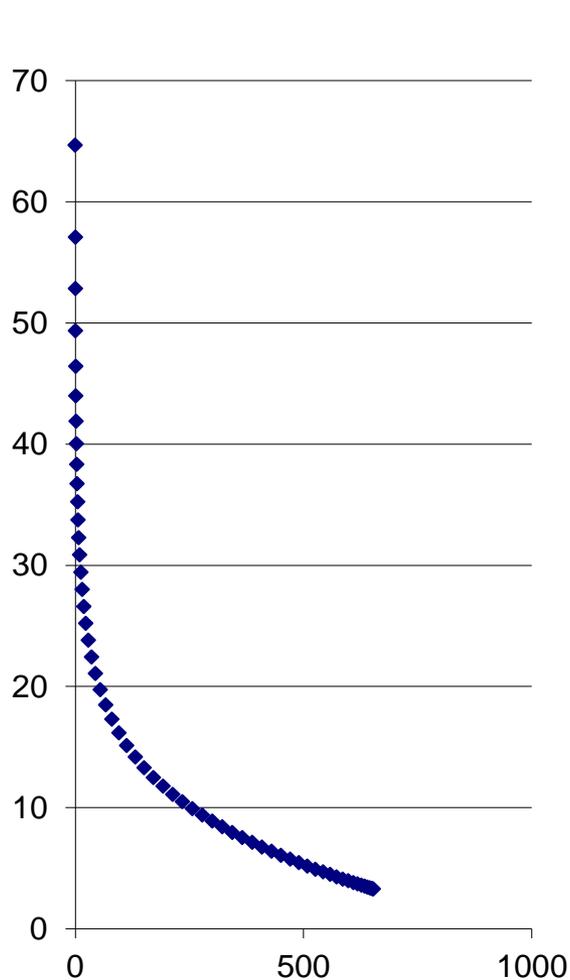
Вертикальные профили температуры (слева) и абсолютной влажности (справа) воздуха над станцией Concordia при усреднении за 12 дней.



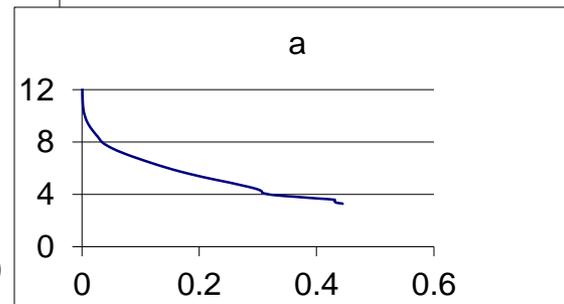
Вертикальные профили температуры, давления и абсолютной влажности воздуха над станцией Concordia 4 января 2015 г. в 12 Гр. по данным реанализа



Температура, К



Давление, гПа



Абсолютная влажность, г/м³

МТВЗА-ГЯ. Моделирование спектров яркостной температуры системы подстилающая поверхность-атмосфера

$$T_B(\nu, \theta) = \kappa(\nu, \theta) T_s e^{-\tau(\nu) \sec \theta} + \int_0^H T(h) e^{-\int_h^H \gamma(\nu, h') \sec \theta dh'} \sec \theta dh +$$

$$[1 - \kappa(\nu, \theta)] \int_0^\infty T(h) \gamma(\nu, h) e^{-\int_0^h \gamma(\nu, h') \sec \theta dh'} \sec \theta dh e^{-\tau(\nu) \sec \theta} +$$

$$[1 - \kappa(\nu, \theta)] T^C(\nu) e^{-2\tau(\nu) \sec \theta}$$

T_B – яркостная температура на частоте ν , θ - угол падения (0, 53, 55, 65)

T_s – термодинамич. температура, а κ - коэф. излучения поверхности

$T(h)$ – температура воздуха на высоте h , H – высота спутника,

$\tau_o = \int_0^\infty \gamma(h) dh$ - полное поглощение атмосферы,

$\gamma(h)$ – коэффициент поглощения,

T^C = - реликтовое космическое излучение на верхней границе ат-ры.

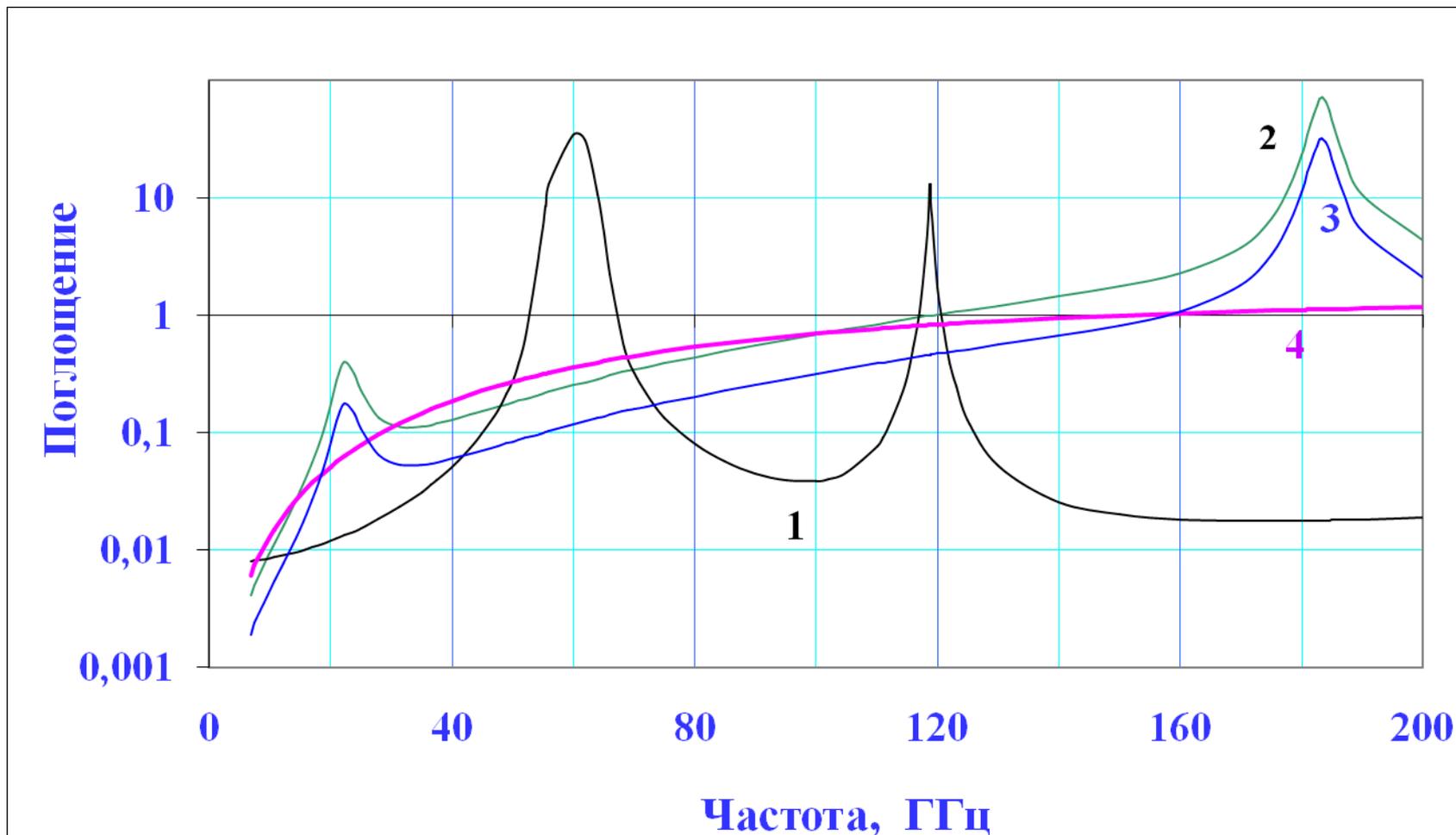
Frequency [GHz]	10.65	18.7	23.8	36.64	89.0	166.5	183.31
T_c [Kelvin]	2.74	2.75	2.77	2.82	3.27	4.43	4.76

Яркостная температура системы атмосфера – подстилающая поверхность

$$T_{\text{я}}^{\text{В,Г}}(\nu, \theta, t_0, W) = \chi^{\text{В,Г}}(\nu, \theta, t_0, W) \cdot T_0 \cdot e^{-\tau(\nu) \sec \theta} + T_{\text{я}}^{\uparrow}(\nu, \theta) + T_{\text{я}}^{\downarrow}(\nu, \theta) [1 - \chi^{\text{В,Г}}(\nu, \theta, t_0, W)] e^{-\tau(\nu) \sec \theta} + T_{\text{к}} \cdot [1 - \chi^{\text{В,Г}}(\nu, \theta, t_0, W)] \cdot e^{-2\tau(\nu) \sec \theta}$$

Известны с хорошей точностью или оказывают малое влияние на $T_{\text{я}}$: температура океана t_0 , скорость ветра W , поглощение в кислороде $\tau_{\text{к}}$. *Известно приближенно паросодержание атмосферы V* , а следовательно, $T_{\text{я}}$ холодной области океана. Погрешность задания V снижается, если воспользоваться данными других спутников.

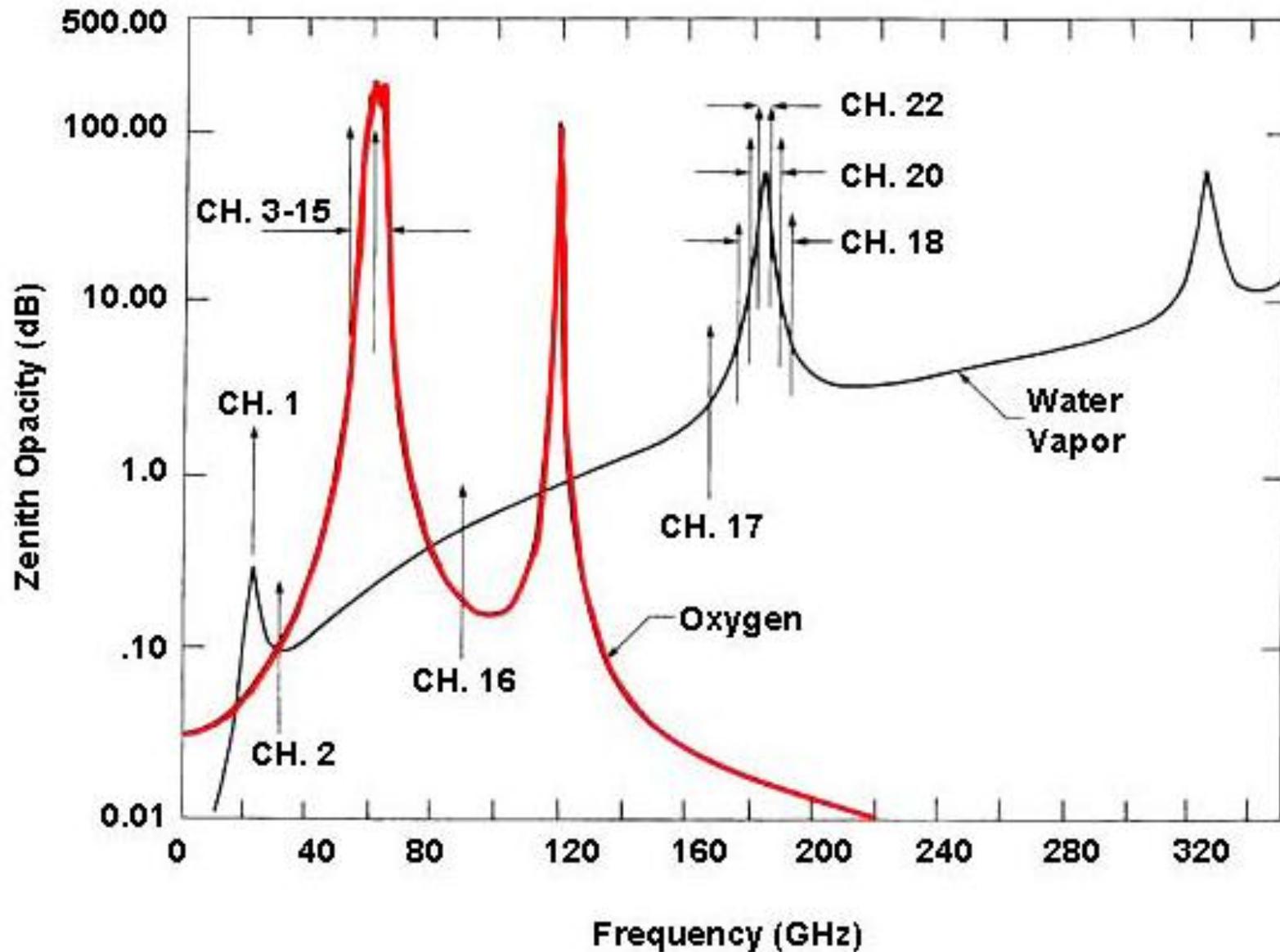
Спектр поглощения атмосферы

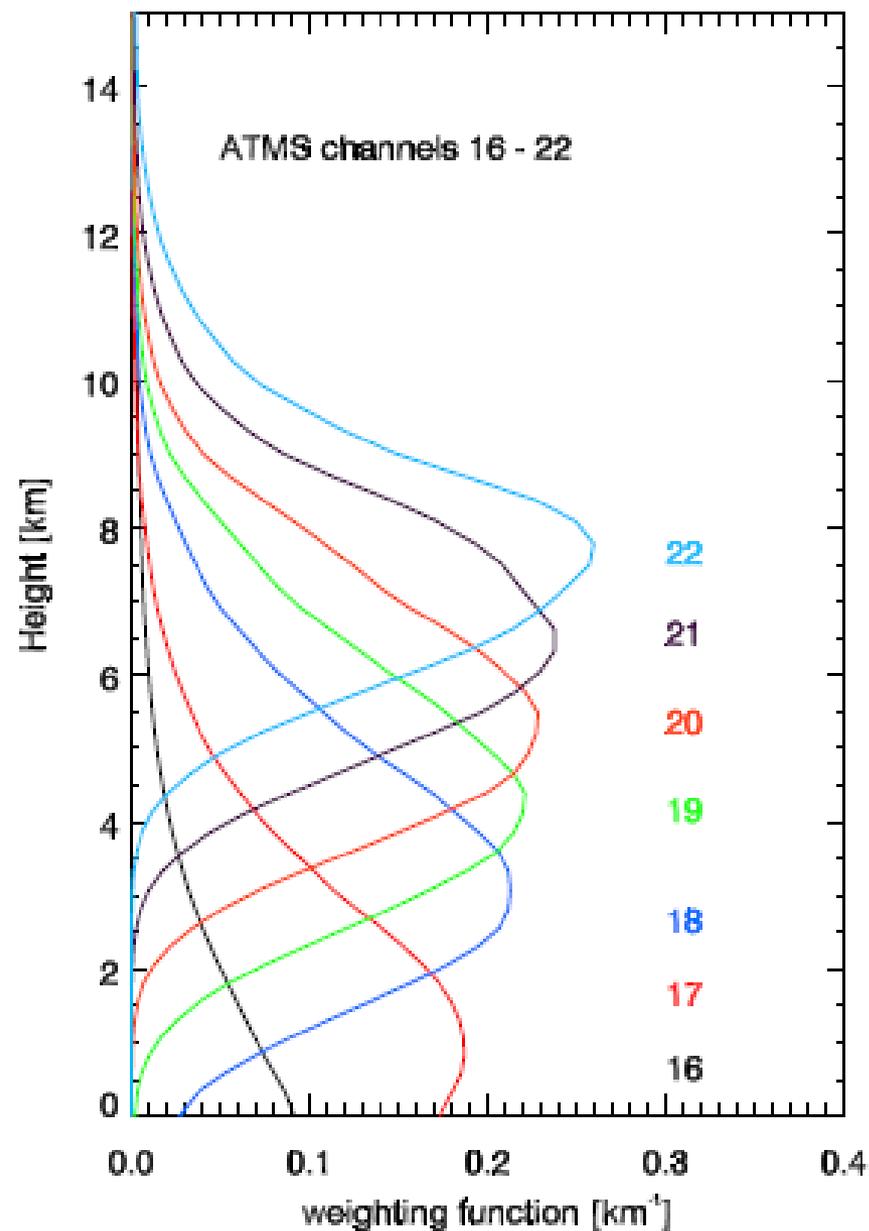
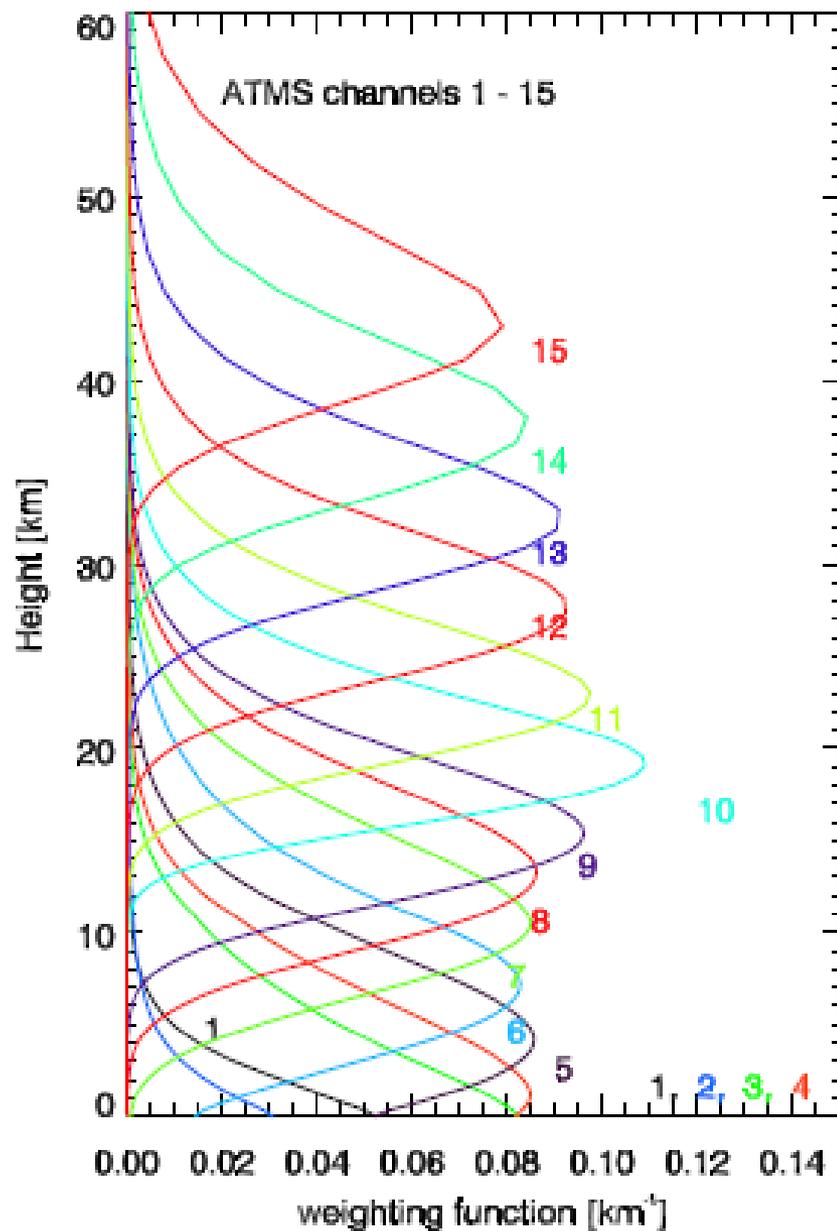


Спектры полного поглощения в водяном паре при $V = 59$ (1) и 28 кг/м^2 (2), в кислороде (3) и в облаках при $Q = 0.6 \text{ кг/м}^2$ and $t_{cl} = 0^\circ\text{C}$ (4)

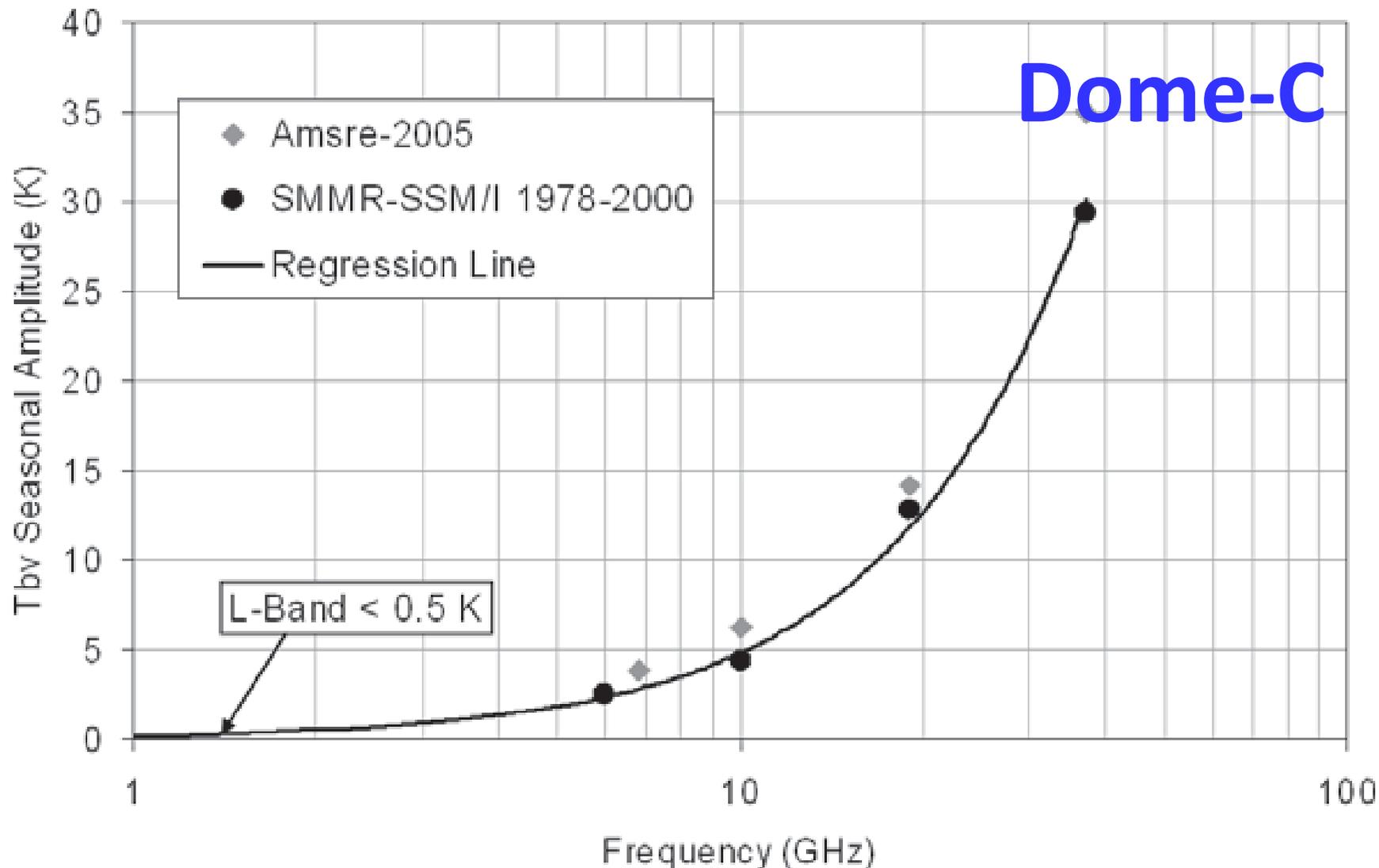
Каналы и частоты ATMS

(Advanced Technology Microwave Sounder)





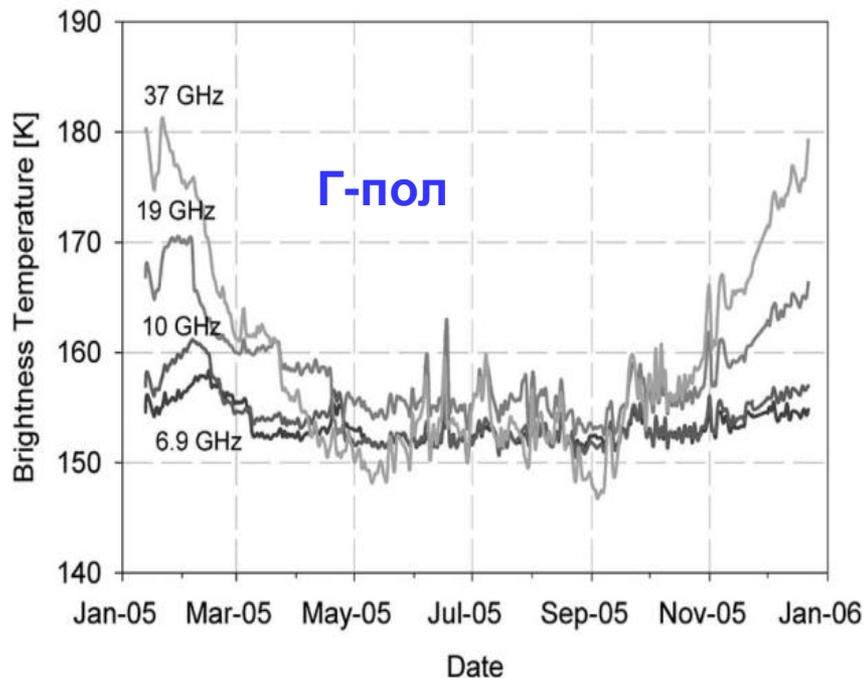
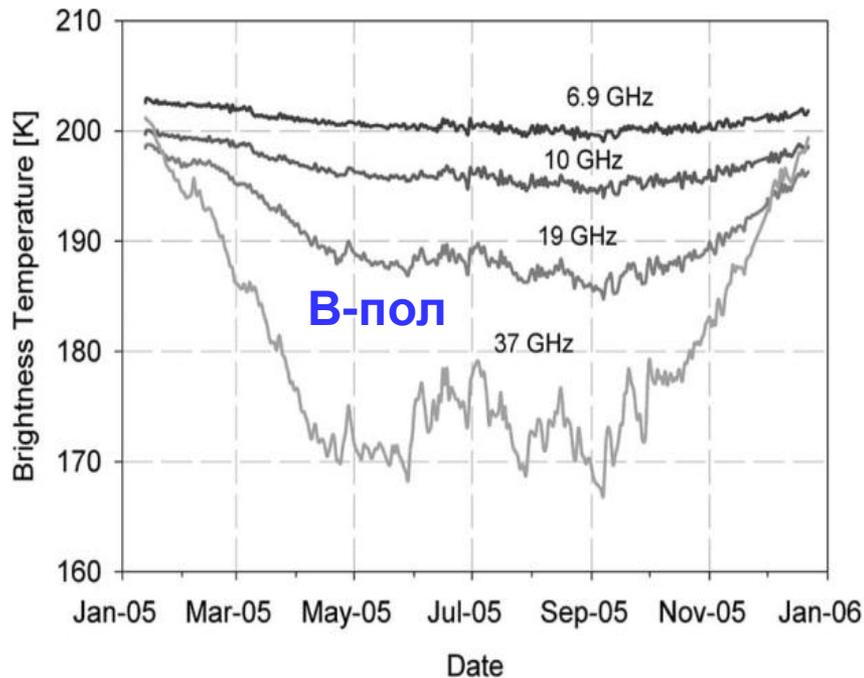
Весовые функции каналов 1-15 (слева) и 16-22 (справа) с



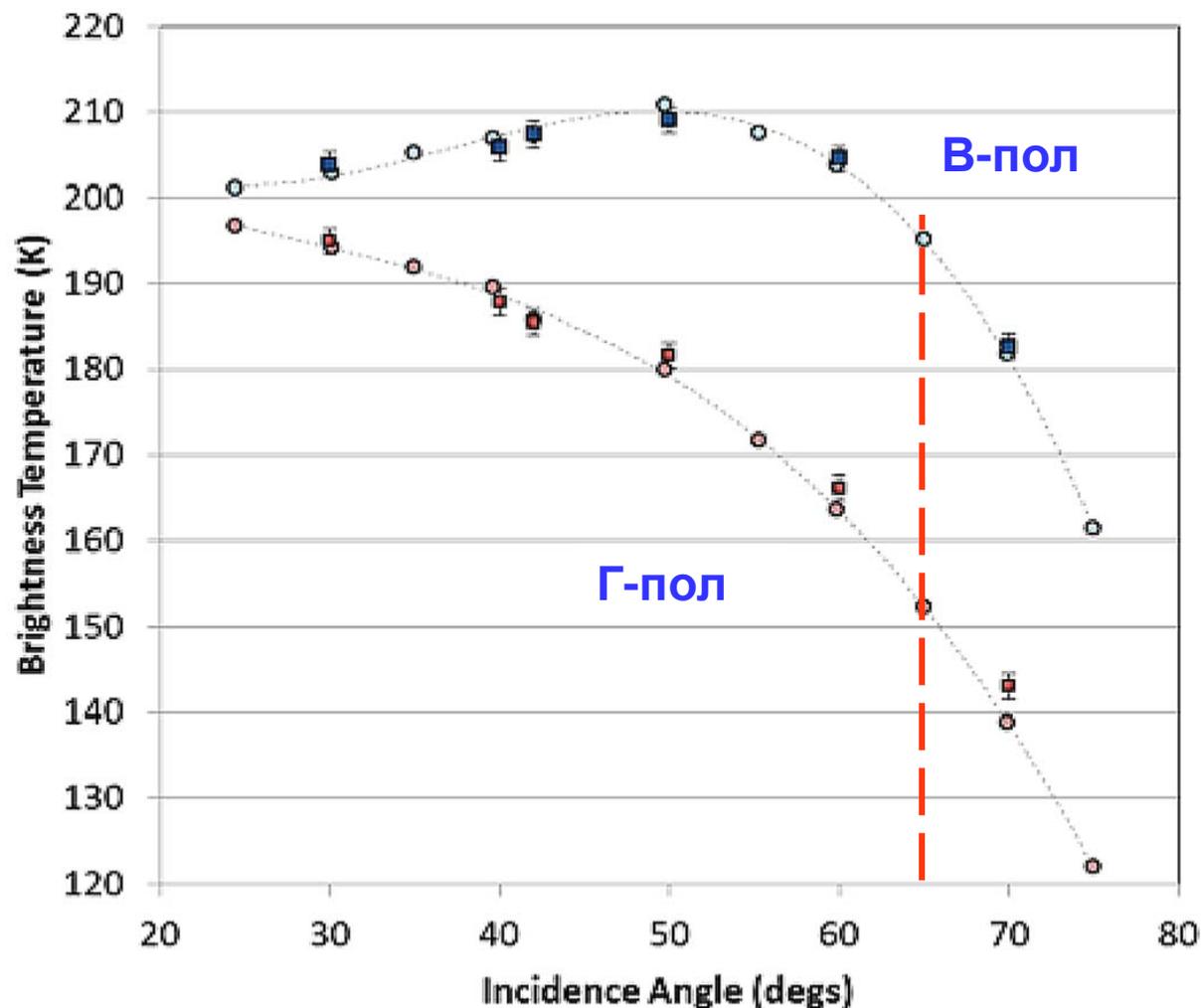
Mean seasonal variation in brightness temperatures, vertical polarization, as a function of frequency measured at Dome-C (Black point: 1978-2000 SMMR-SSM/I data, Grey Diamond: 2005 AMSR-E data).

Антарктическое плато

Яркостные температуры на частотах $\nu = 6.9, 10, 19$ и 37 ГГц на В- и Г-поляризациях по измерениям радиометра **Aqua** со спутника **AMSR-E**



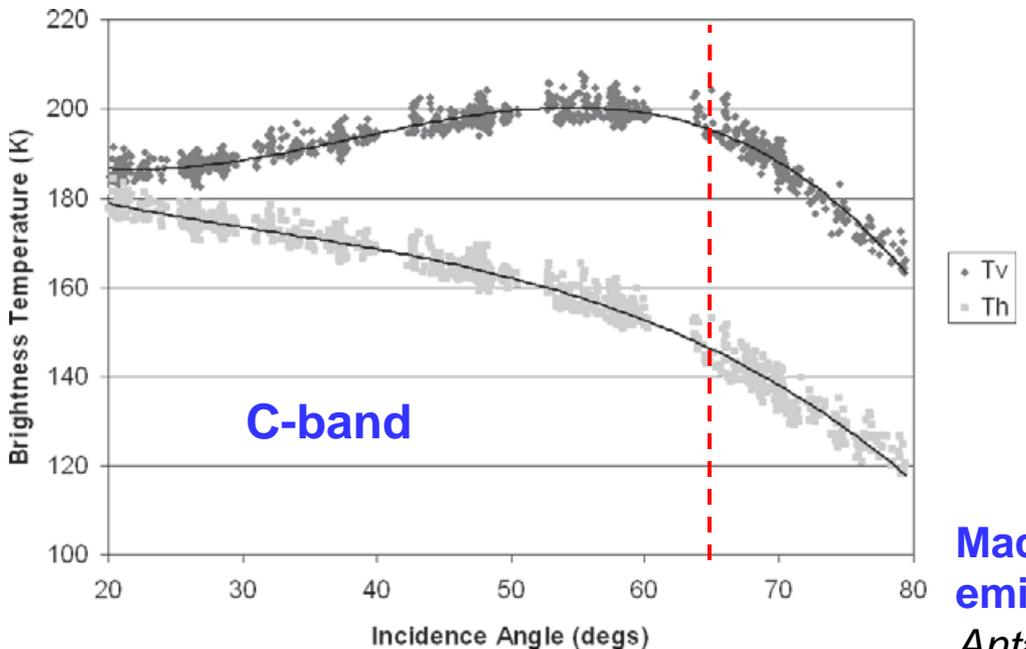
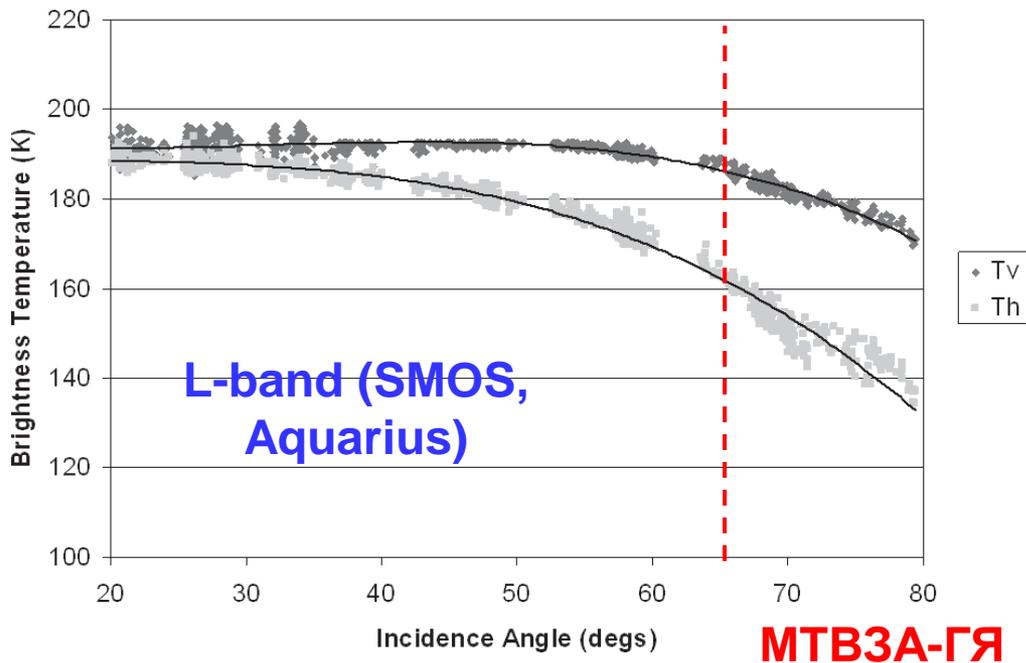
Macelloni et al., 2007



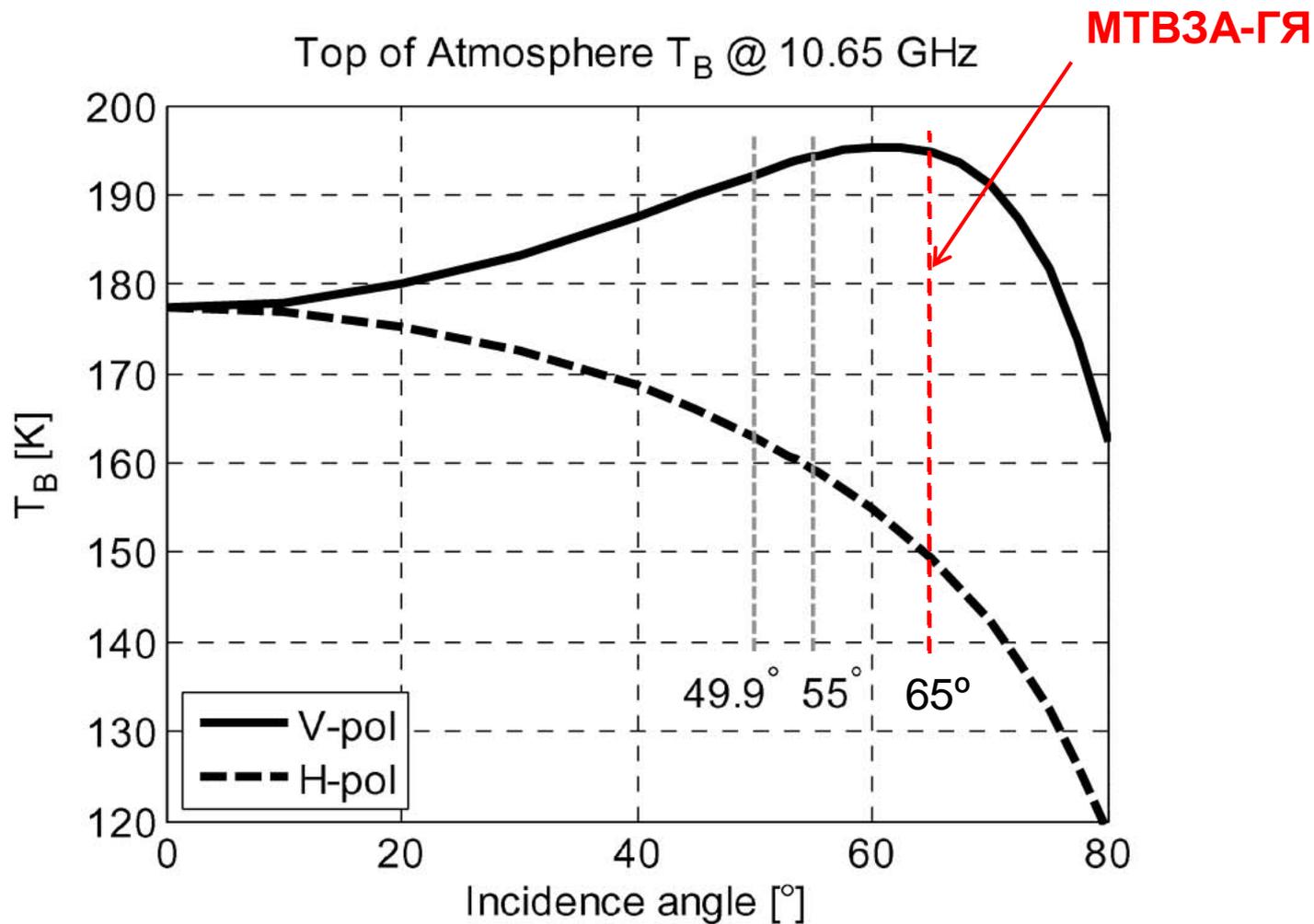
Измеренные яркостные температуры в зависимости от угла падения на В- и Г-поляризациях в экспериментах 2009 и 2010 гг. Данные за 2009 г. показаны голубыми (В-пол) и красными (Г-пол) квадратиками. Данные за 2010 г. показаны круглыми светло-голубыми и светло-красными точками. The error bars for 2009 are also shown in the figure.

Dome-C

Зависимости яркостных температур на горизонтальной (темно серые точки) и вертикальной (светло серые точки) поляризациях от угла падения

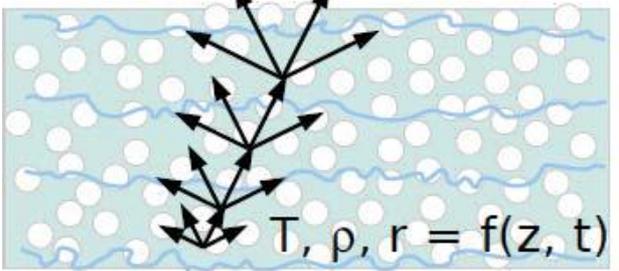


Macelloni G. et al. Low-frequency microwave emission of the Antarctic plateau // *Terra Antarctica Reports*. 2008, Vol. 14, pp. 163-168

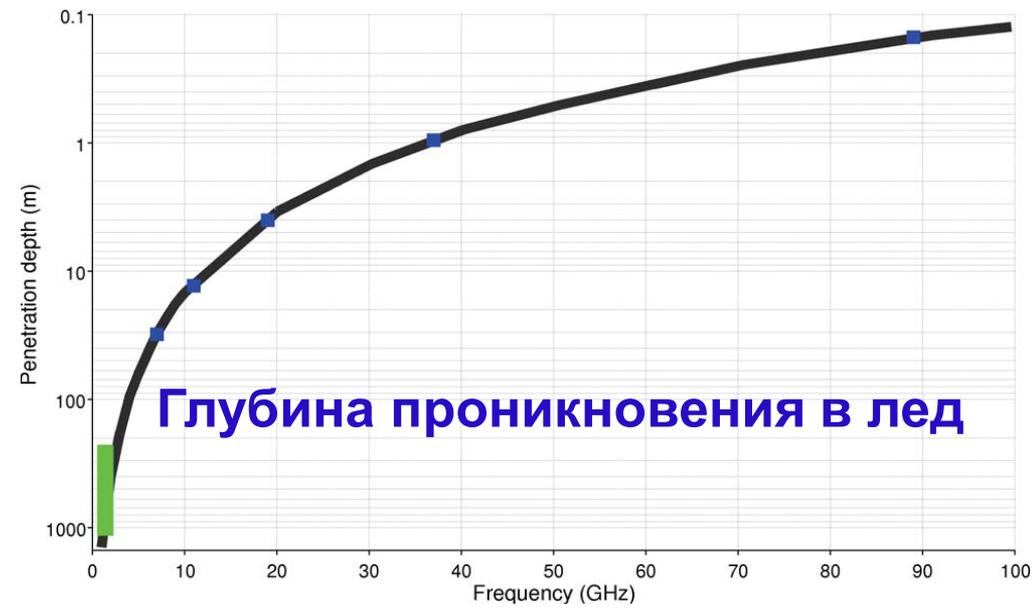


Расчетная зависимость яркостной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях на верхней границе атмосферы от угла падения

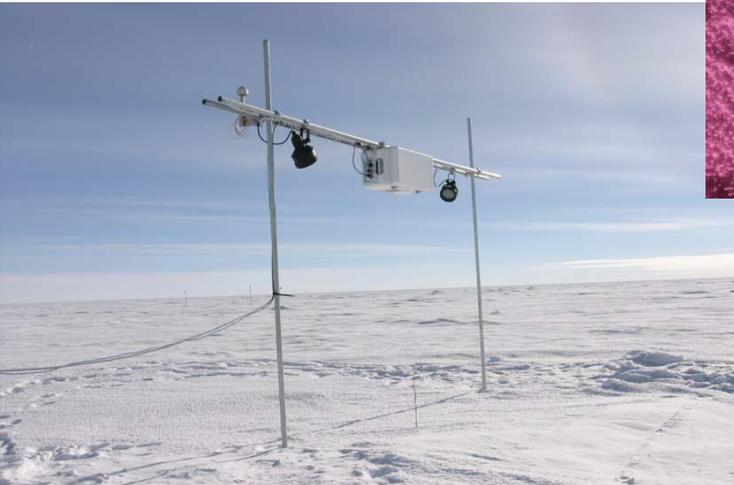
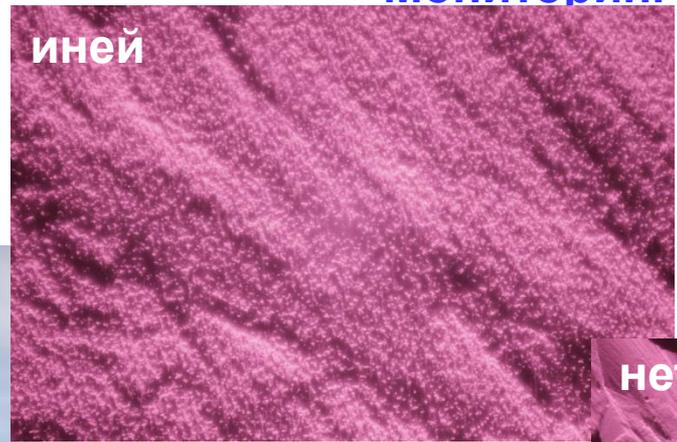
Satellite monitoring of the snow surface at Dome C



Dome C



Мониторинг поверхности снега



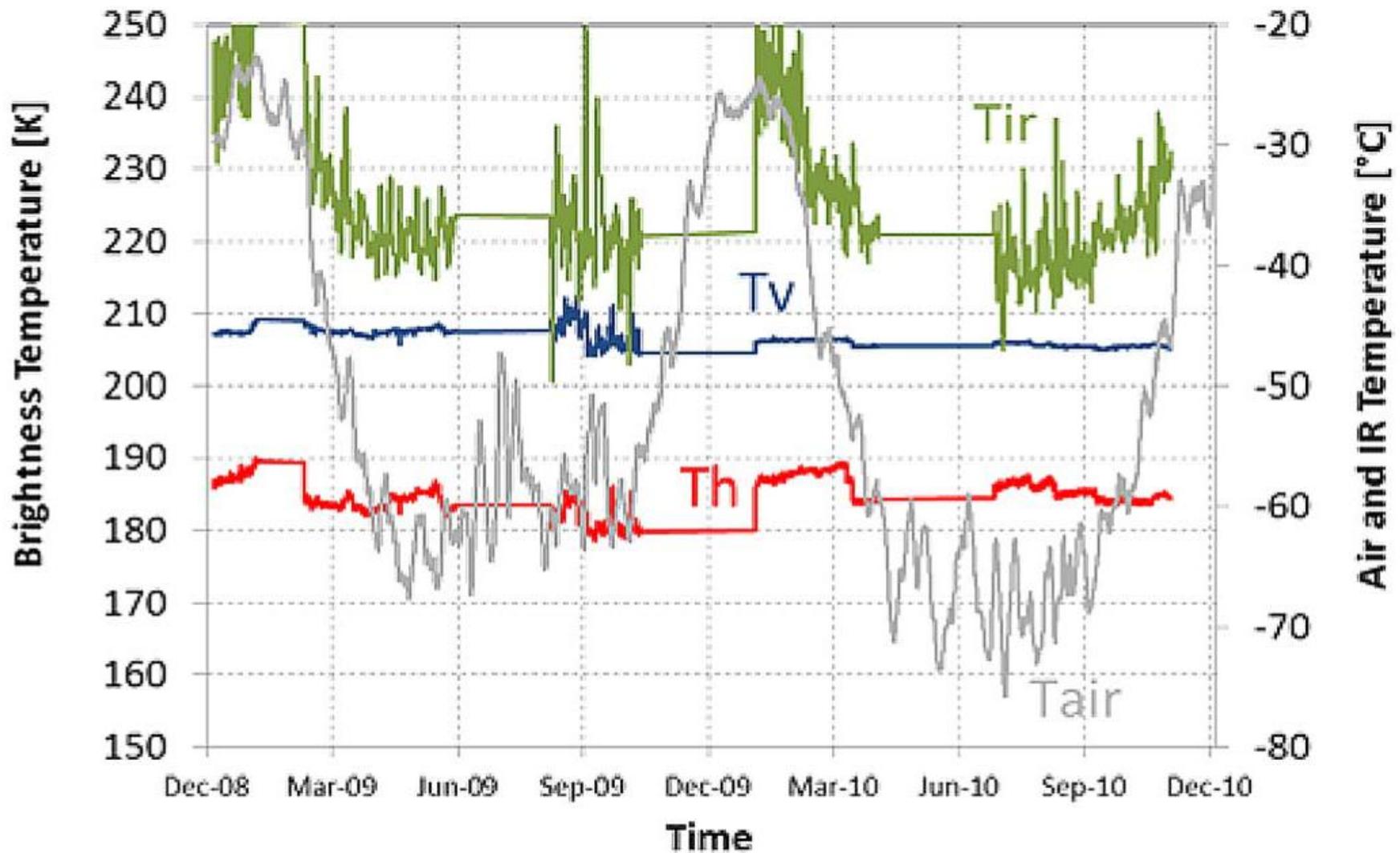
Камера ближнего ИК диапазона на высоте 2 м. Размер изображения ~ 4 м²

Aquarius и кристаллы инея на поверхности

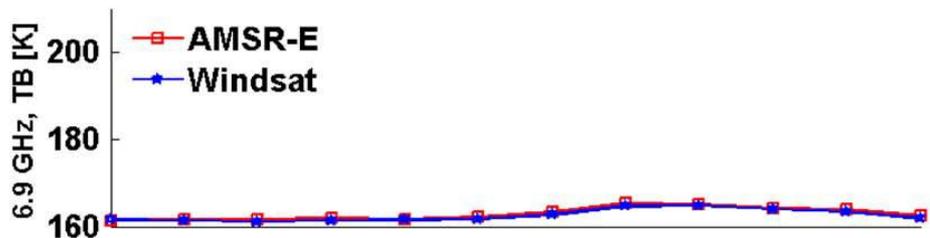


Brucker et al. Effect of snow surface metamorphism on Aquarius L-band radiometer observations at Dome C, Antarctica. *IEEE TGRS*. 2014. 52(11): 7408-7417.

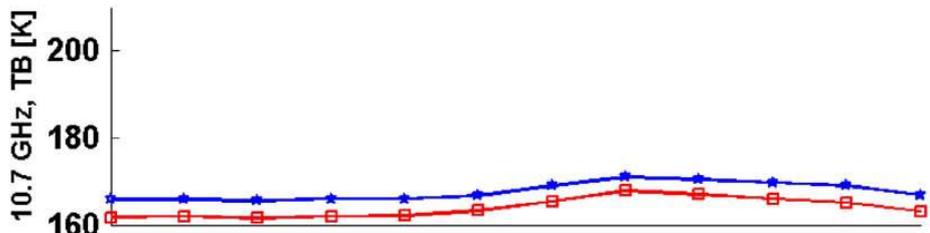
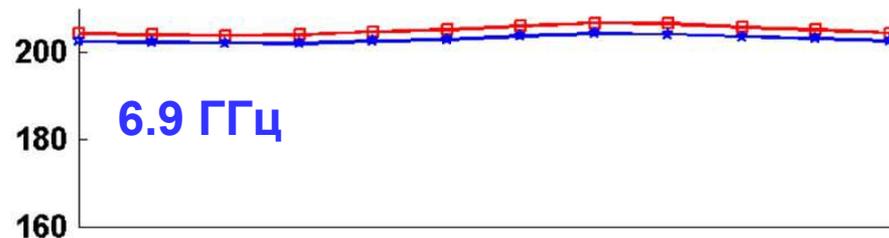
Измерения в L-диапазоне



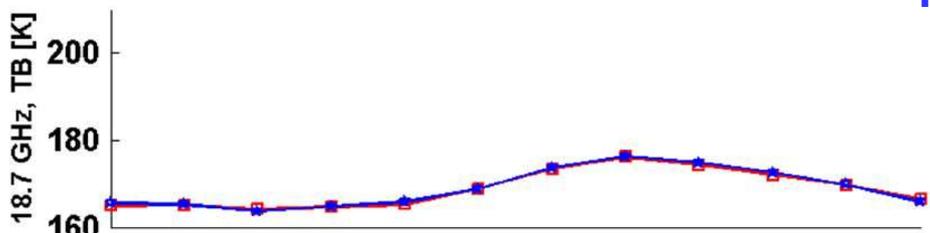
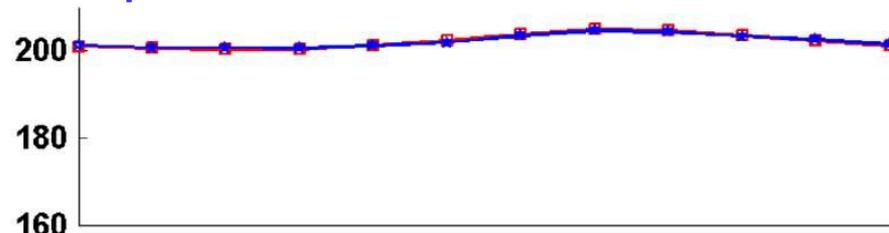
Г-поляризация



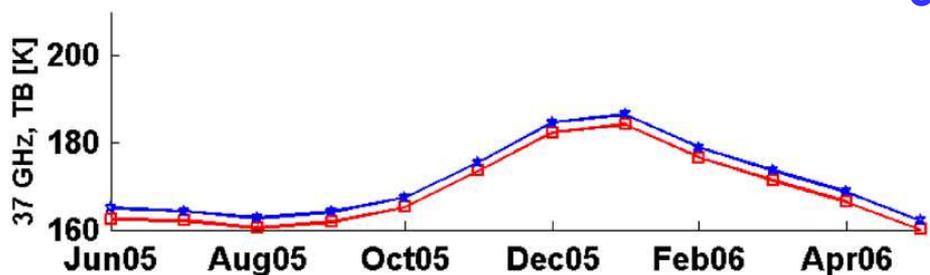
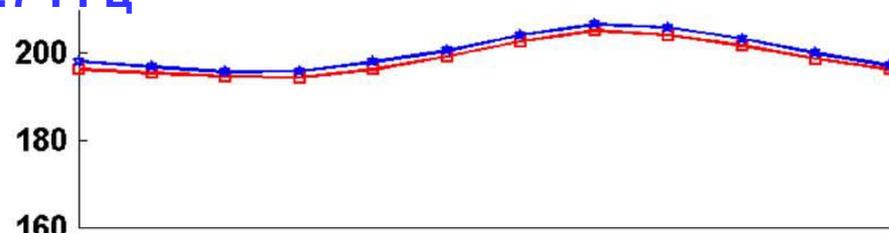
В-поляризация



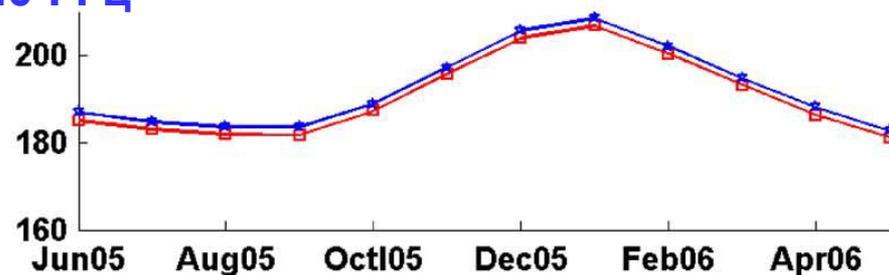
10.7 ГГц



18.7 ГГц



37.0 ГГц



Временные ряды среднемесячных яркостных температур для AMSR-E и WindSat (Г- и В-пол.) над областью Dome C за период с 1 июня 2005 по 31 мая 2006 г.

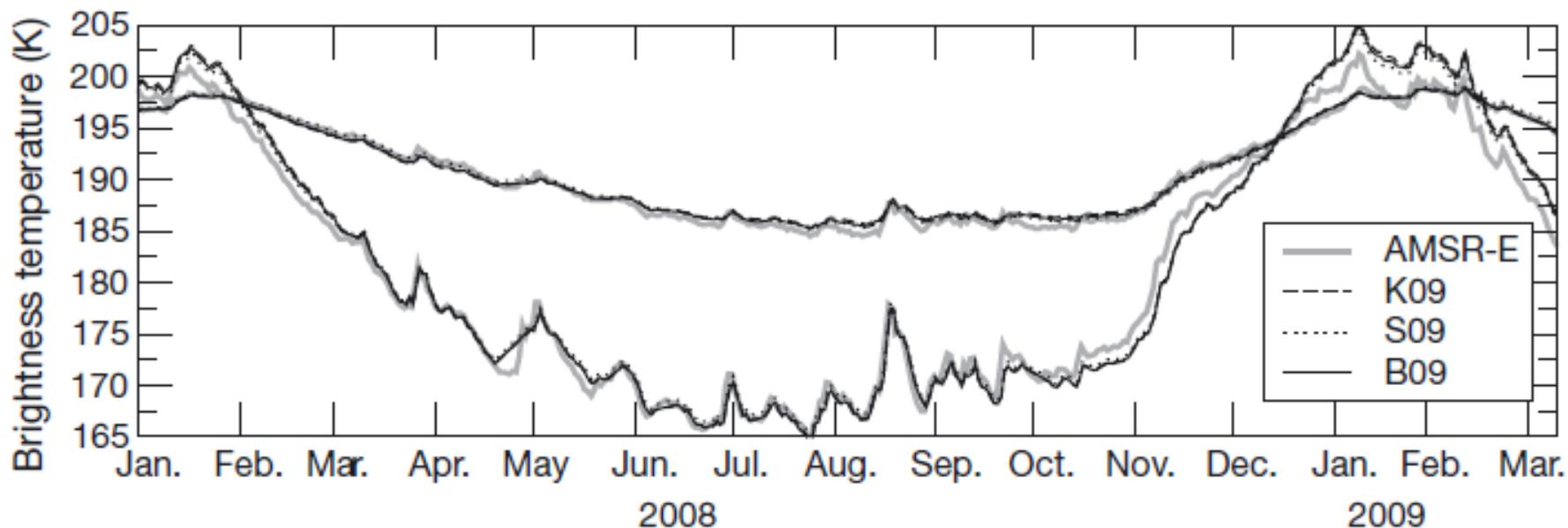
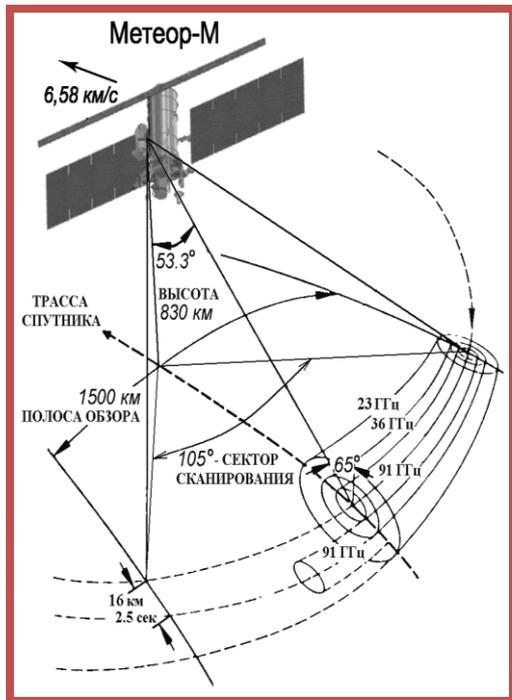


Fig. 6. Observed (gray curves) and modeled time series of vertically polarized brightness temperature at Dome C between January 2008 and March 2009 at 18.7 and 36.5 GHz using an optimized snow grain-size profile (i.e. α and $r^{z>3m}$ calibrated) for each relationship (DC, ADC and KZ04).

Brucker L., Picard G., Arnaud L. et al. Modeling time series of microwave brightness temperature at Dome C, Antarctica, using vertically resolved snow temperature and microstructure measurements. *J. Glaciology*. 2011. Vol. 57. No. 201, P. 171-182



Статус, назначение и параметры многофункционального СВЧ-радиометра **МТВЗА-ГЯ** КА «Метеор-М» №2

Прибор Параметры	МТВЗА-ГЯ
Диапазон	10.6, 18.7, 23.8, 31.5, 36.5, 42, 48, 91, <u>52-57,</u> <u>183.31</u> , ГГц
Количество каналов	29
Пространственное разрешение	16-198 км
Чувствительность	0.3-1.7 К/пиксель
Полоса обзора	1500 км
Сканирование	коническое
Режим работы	непрерывный
Период сканиров.	2.5 с
Поток данных	35 Кбит/с
Объем ЗУ	1 Гбайт
Масса, не более	94 кг
Потребление, не более	80 Вт

СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ функционирует с 30 июля 2014 г.

- определение вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы;
- определение водозапаса облаков, паросодержания атмосферы и интенсивности осадков;
- определение скорости приводного ветра и температуры поверхности океана;
- мониторинг ледовых и снежных покровов.

Технические характеристики СВЧ-радиометра

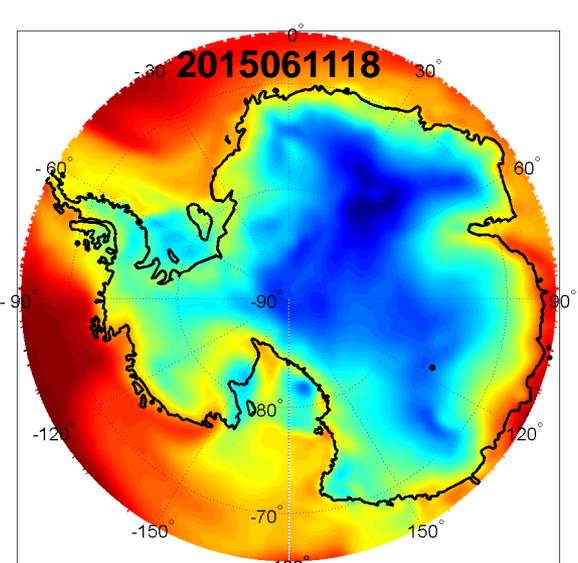
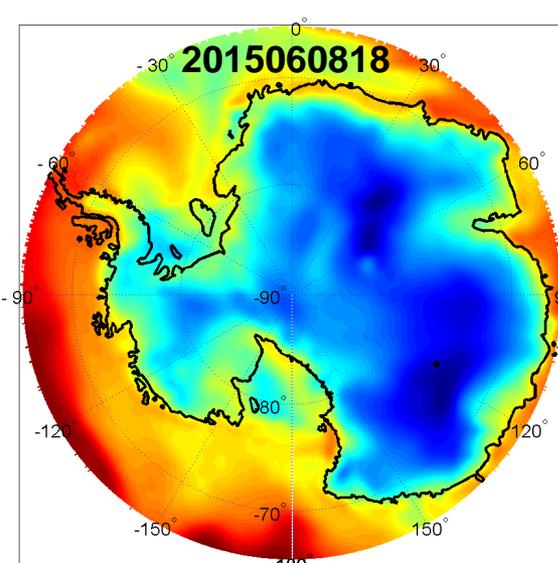
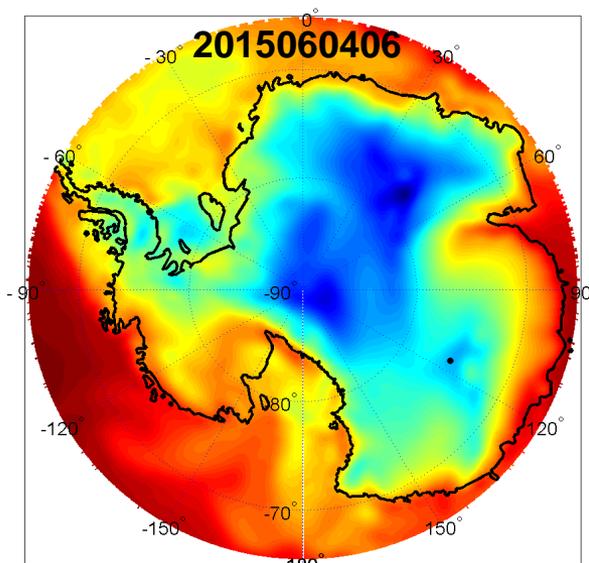
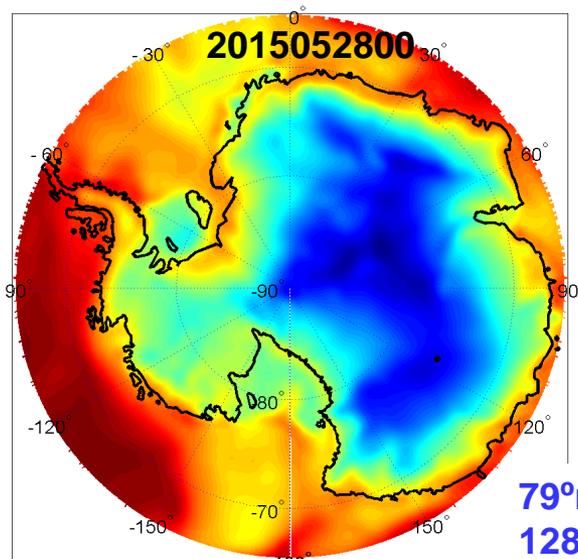
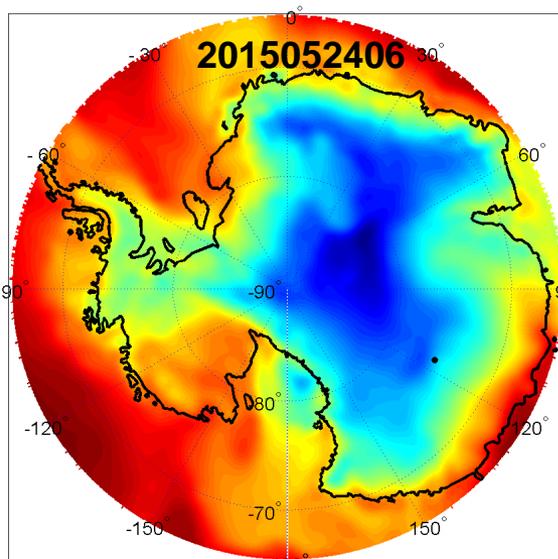
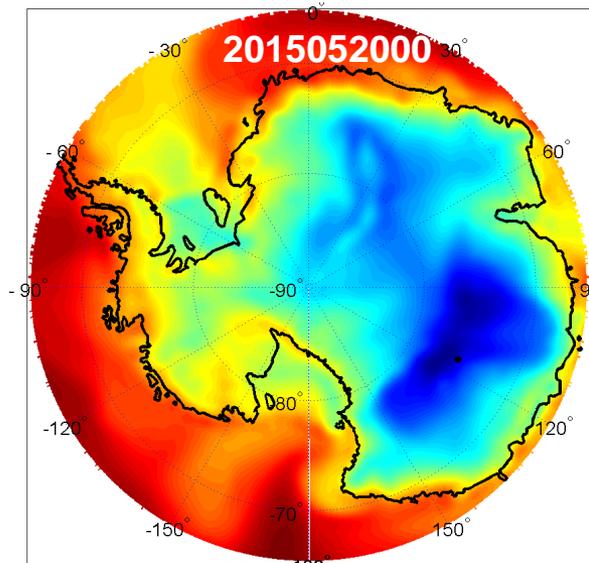
МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» №2

(согласно ТЗ и регламенту Международного союза электросвязи)

Центральная частота, ГГц	Кол-во полос	Поляризация	Ширина полосы, (-3дБ) МГц	Антенное пятно кмхкм	Пиксель изображения кмхкм	Высота максимума весовой функции, км	Чувствительность не хуже К/пиксель	Примечание	Подтверждение характеристик ЛИ
10.65	1	V, H	100	89x198	32x32	-	0.5		Да
18.7	1	V, H	200	52x116	32x32	-	0.4		Да
23.8	1	V, H	400	42x94	32x32	-	0.3		Да
31.5	1	V, H	1000	35x76	32x32	-	0.3		Да
36.5	1	V, H	1000	30x67	32x32	-	0.3		Да
42.0	1	V, H	1000	26x60	32x32	-	0.4		Да
48.0	1	V, H	1000	24x43	32x32	-	0.4		Да
91.65	2	V, H	2000	14x30	16x16	-	0.6		Да
52.80	1	V	400	21x48	32x32	2	0.4		Да
53.30	1	V	400	21x48	32x32	4	0.4		
53.80	1	V	400	21x48	32x32	6	0.4		
54.64	1	V	400	21x48	32x32	10	0.4		
55.63	1	V	400	21x48	32x32	14	0.4		
Fo±0.1	4	H	50	21x48	48x48	20	0.4		Да
Fo±0.05	4	H	20	21x48	48x48	25	0.7	Пиксель 80x80	
Fo±0.025	4	H	10	21x48	48x48	29	0.9	Пиксель 80x80	
Fo±0.01	4	H	5	21x48	48x48	35	1.3	Пиксель 80x80	
Fo±0.005	4	H	3	21x48	48x48	42	1.7	Пиксель 80x80	
183.31 ± 7.0	2	V	1500	9x21	32x32	1.5	0.5		Да
183.31 ± 3.0	2	V	1000	9x21	32x32	2.9	0.6		
183.31 ± 1.0	2	V	500	9x21	32x32	5.3 (4.5)	0.8	183.31 ± 1.4	

Fo=57.290344±0.3222 ГГц

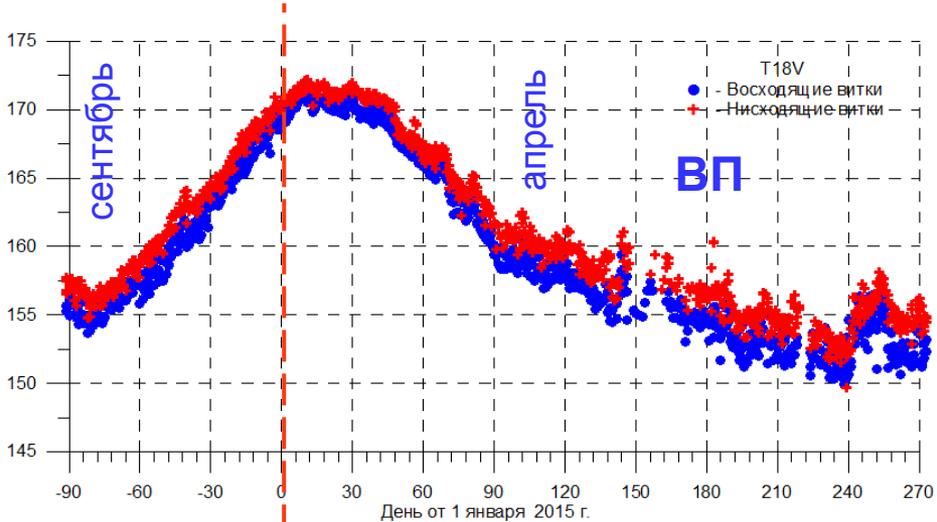
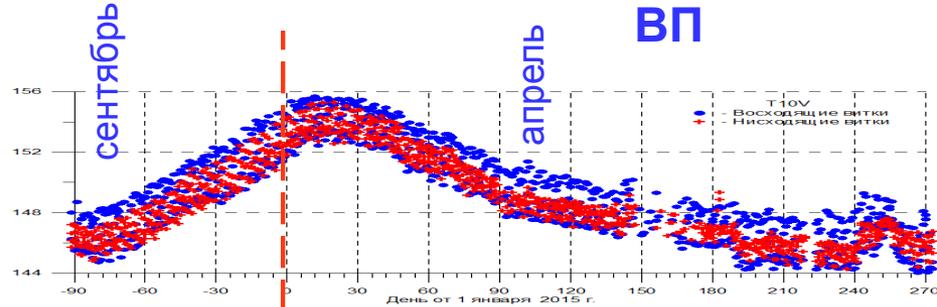
Реанализ ERA-Interim. Температура воздуха на уровне 650 мб. Весна - лето



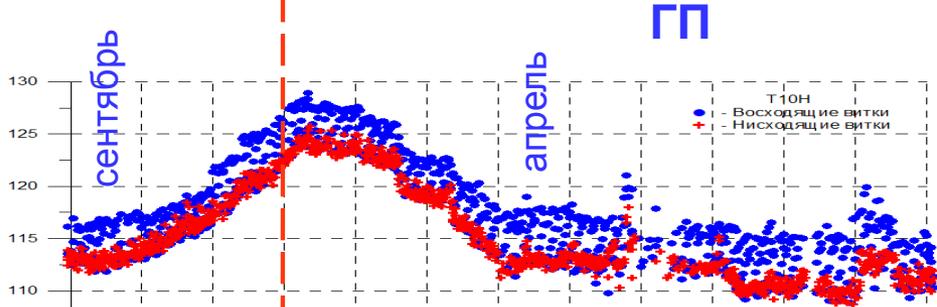
МТВЗА-ГЯ. Измерения над областью Dome C

1 октября 2014 г.- 30 сентября 2015 г.

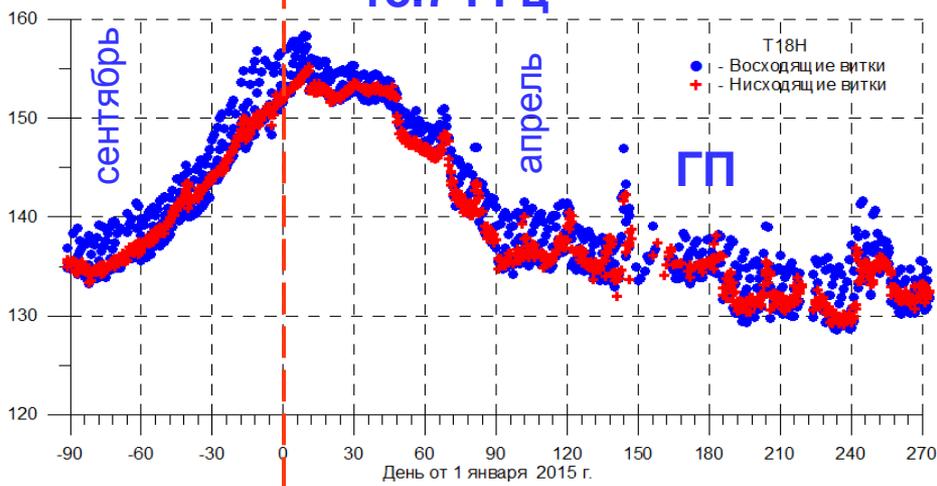
Усреднены данные в круге с центром на 79°ю.ш., 128°в.д. диаметром 100 км.
Синие точки – восходящие витки
Красные точки – нисходящие витки



10.6 ГГц



18.7 ГГц



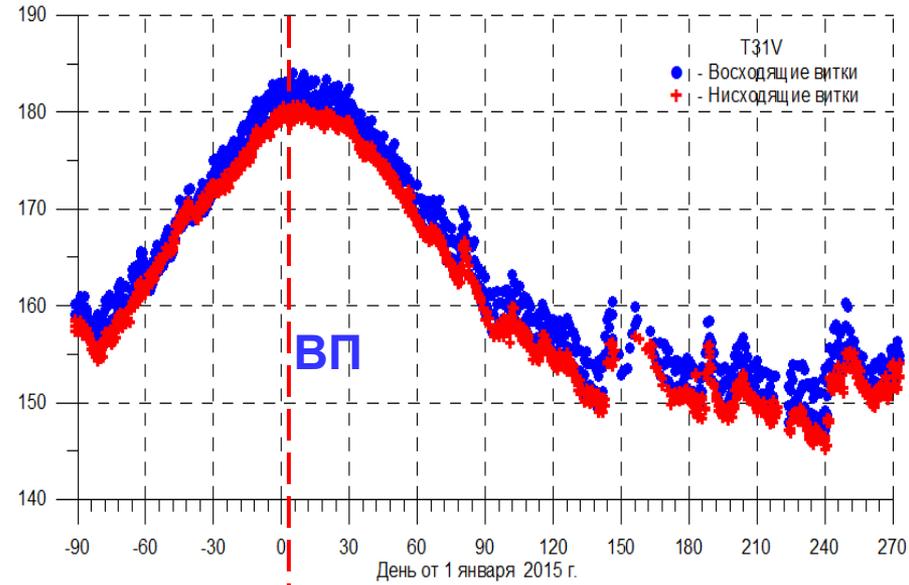
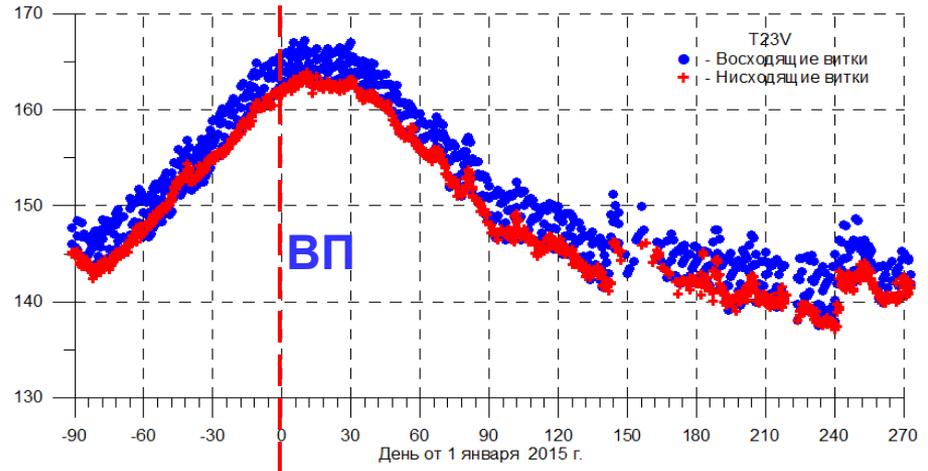
1 января 2015

1 января 2015

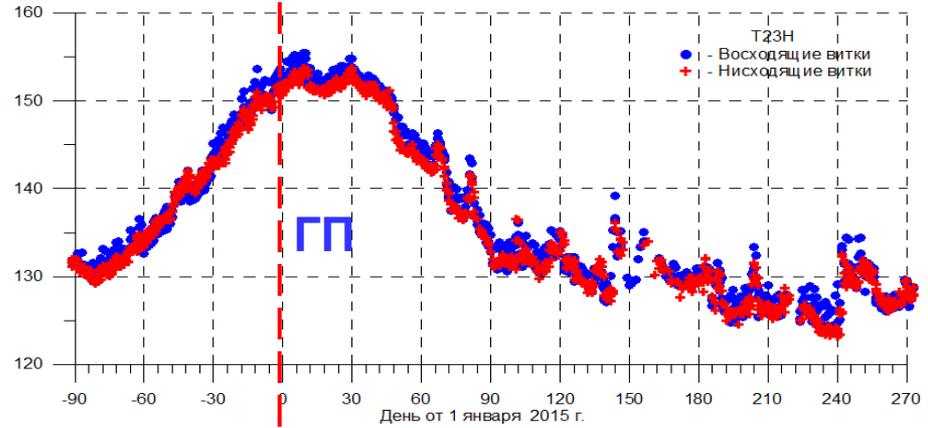
МТВЗА-ГЯ. Измерения над областью Dome C

1 октября 2014 г.- 30 сентября 2015 г.

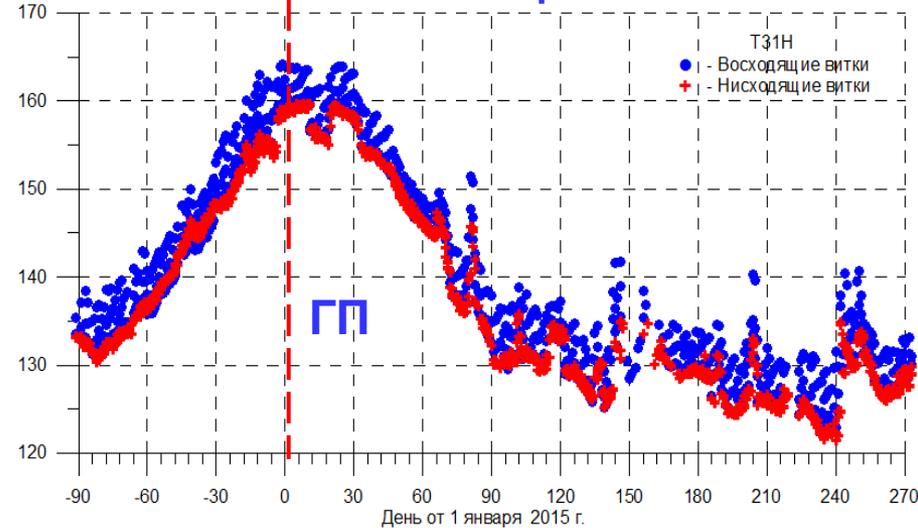
Усреднены данные в круге с центром на 79°ю.ш., 128°в.д. диаметром 100 км.



23.8 ГГц

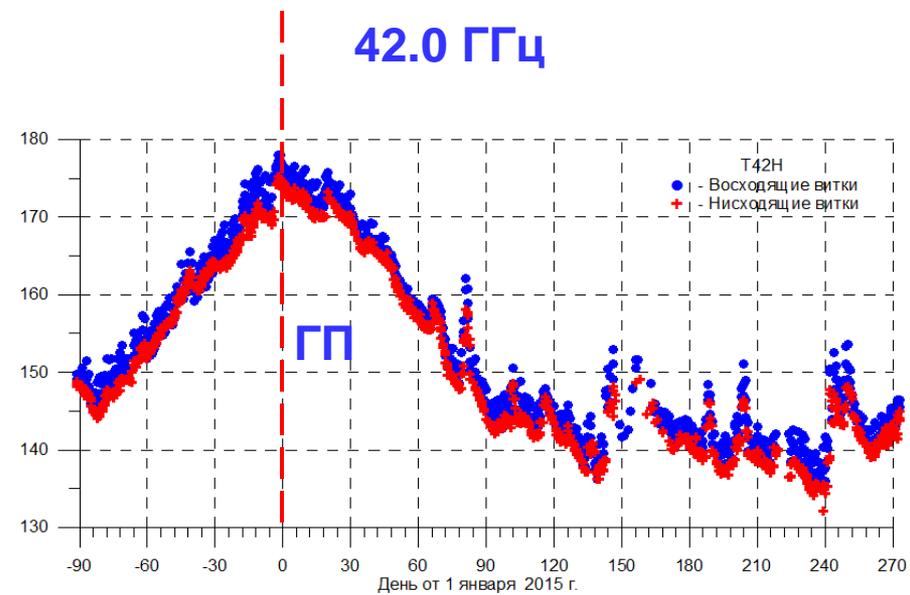
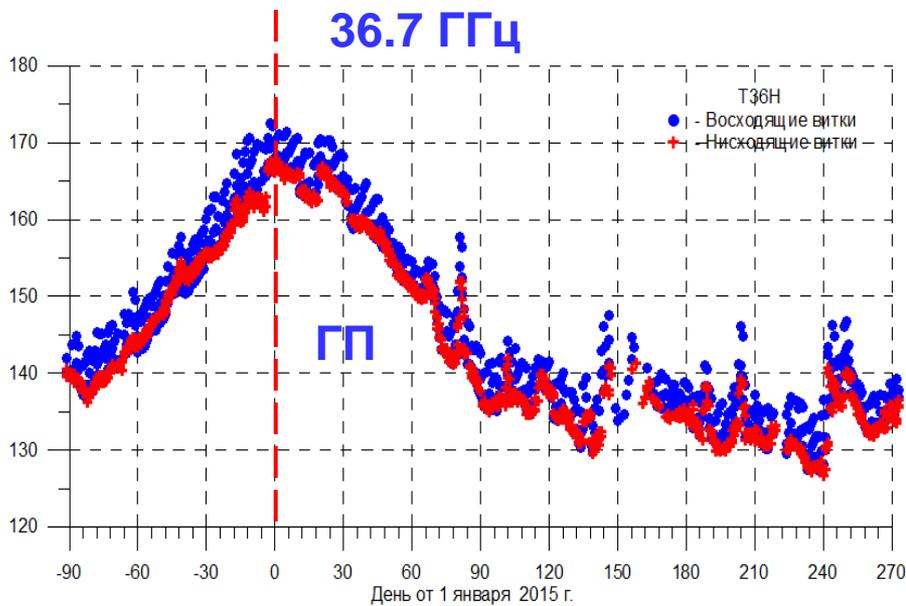
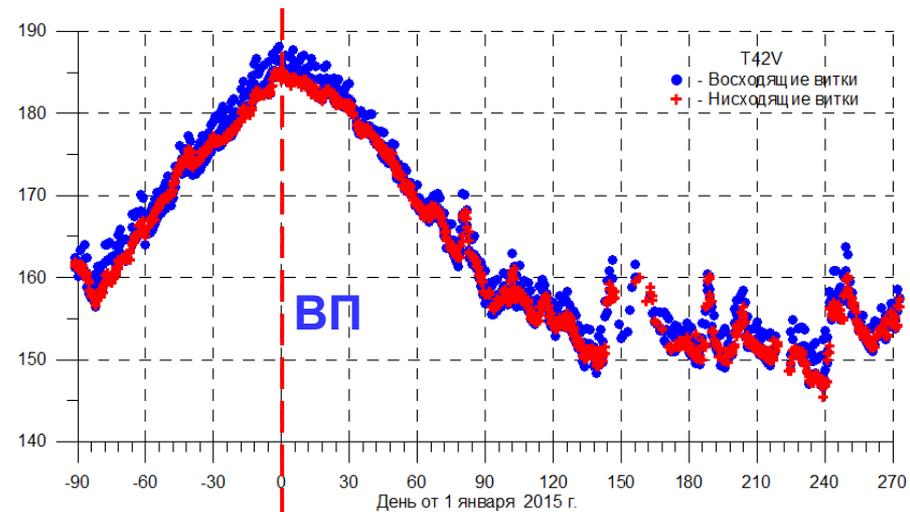
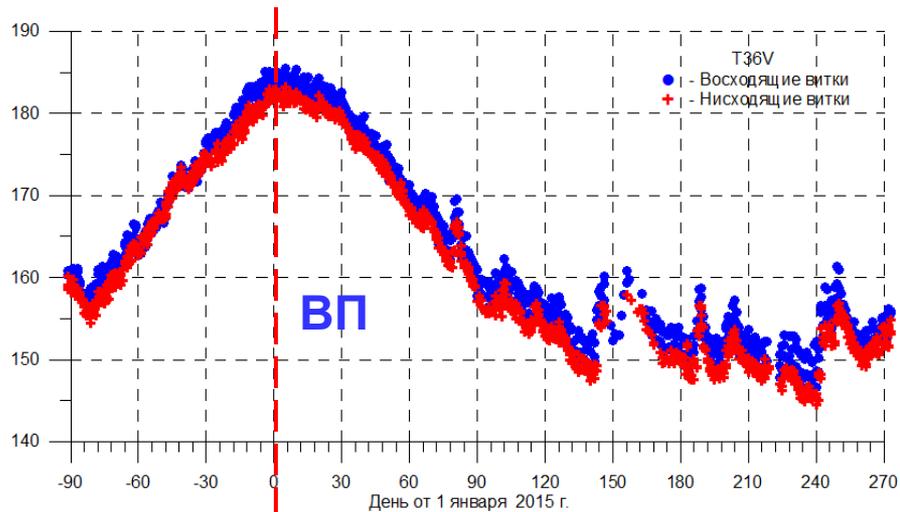


31.5 ГГц



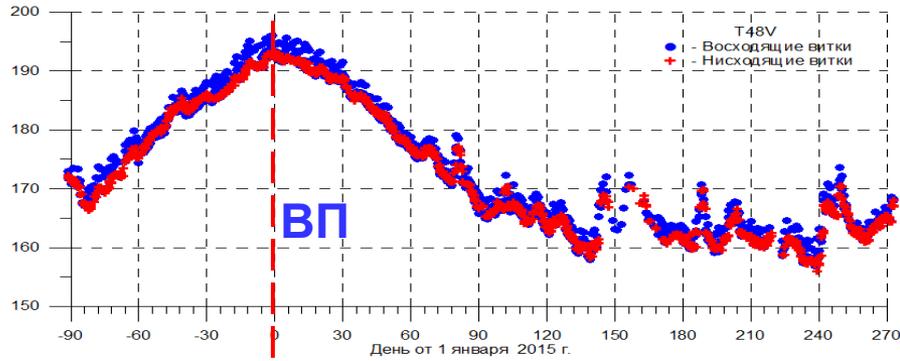
МТВЗА-ГЯ. Измерения над областью Dome C

1 октября 2014 г.- 30 сентября 2015 г.

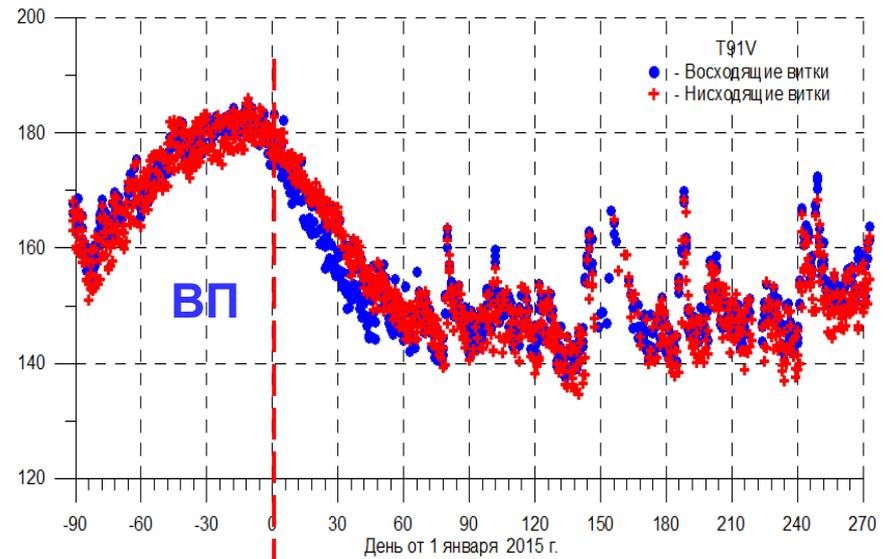
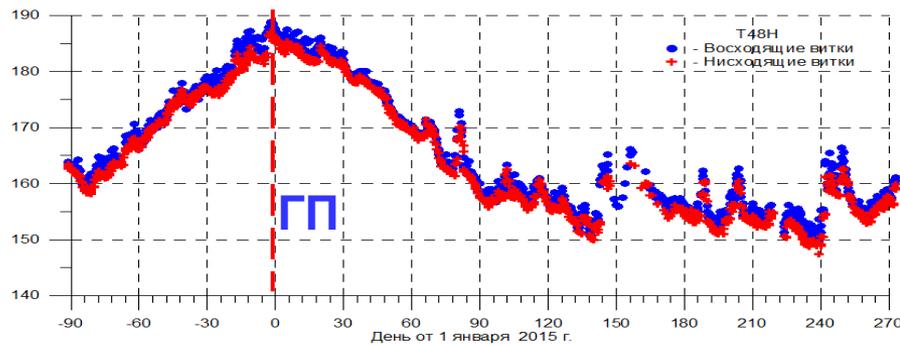


МТВЗА-ГЯ. Измерения над областью Dome C

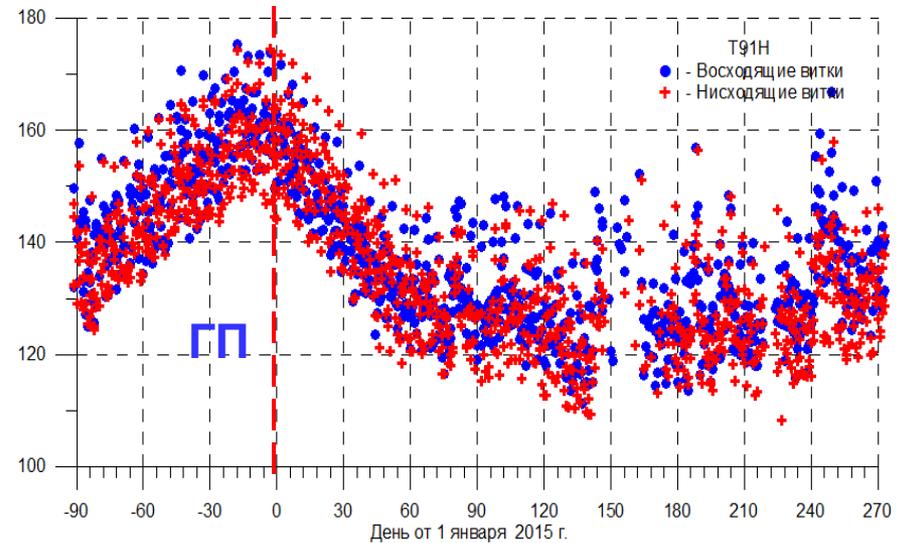
1 октября 2014 г.- 30 сентября 2015 г.



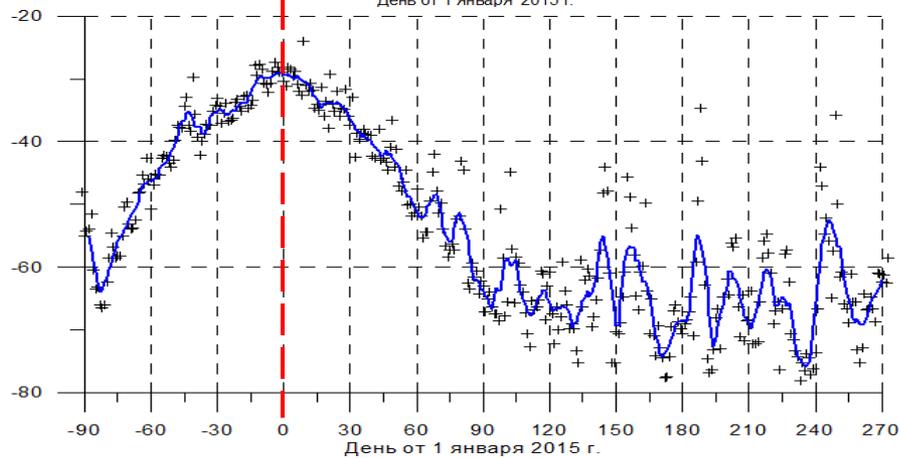
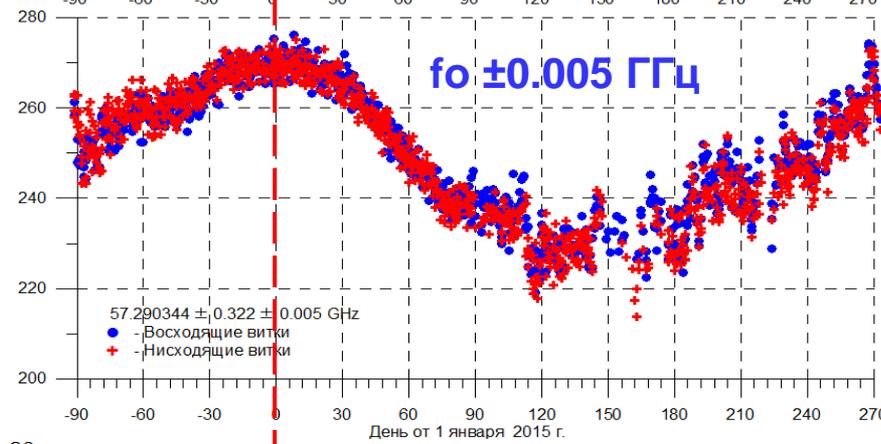
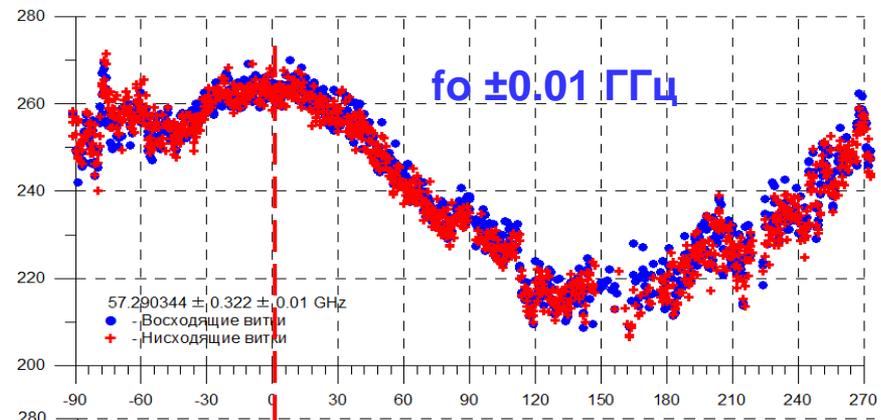
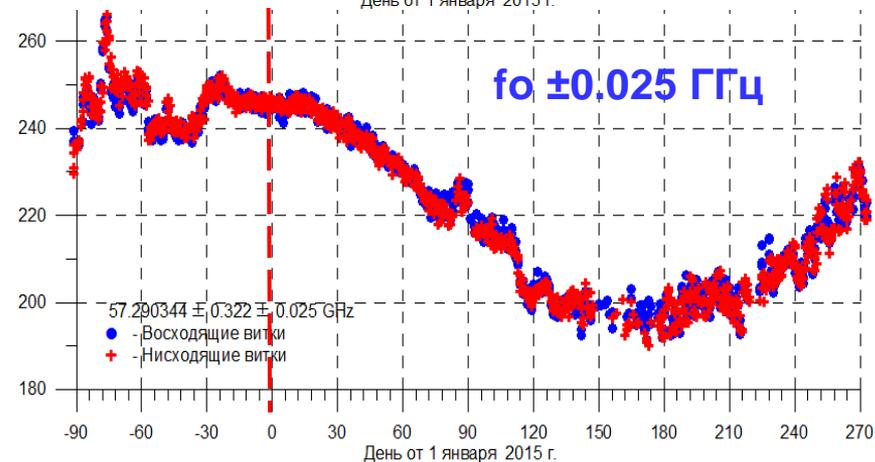
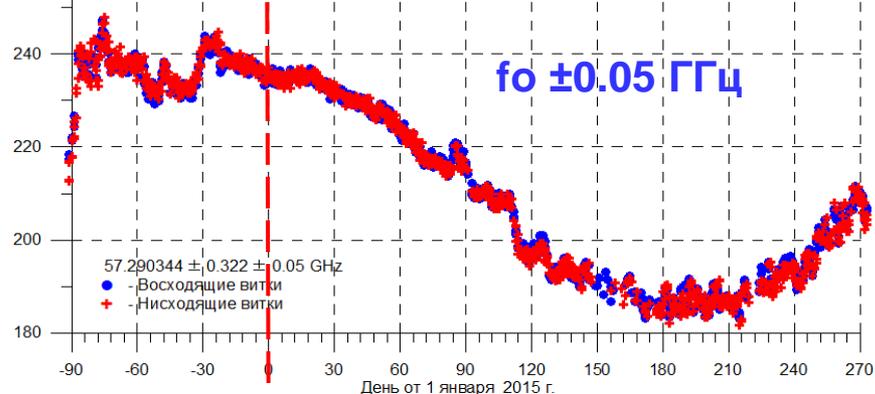
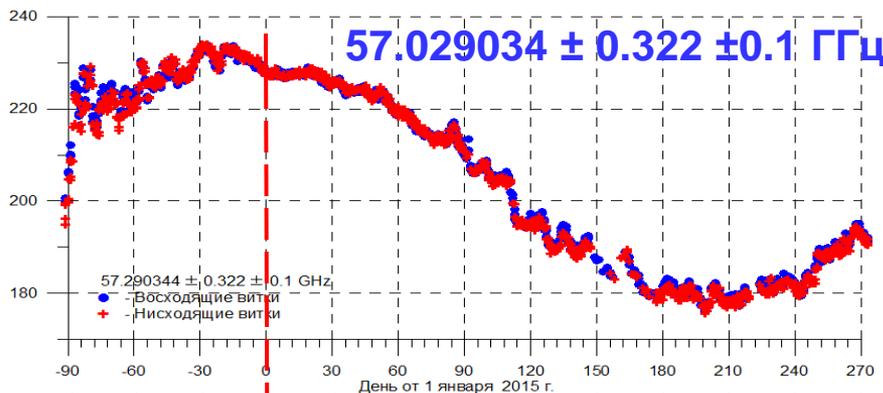
48.0 ГГц



91.5 ГГц

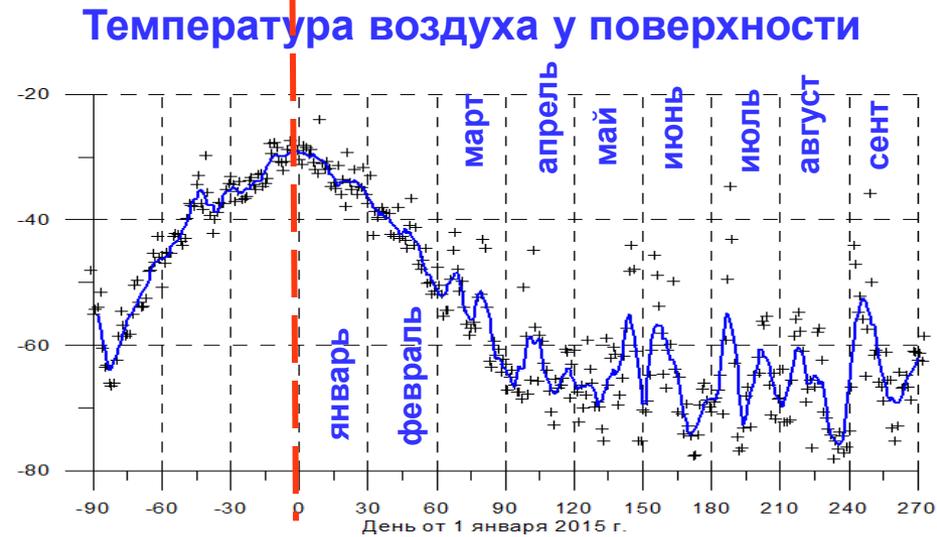
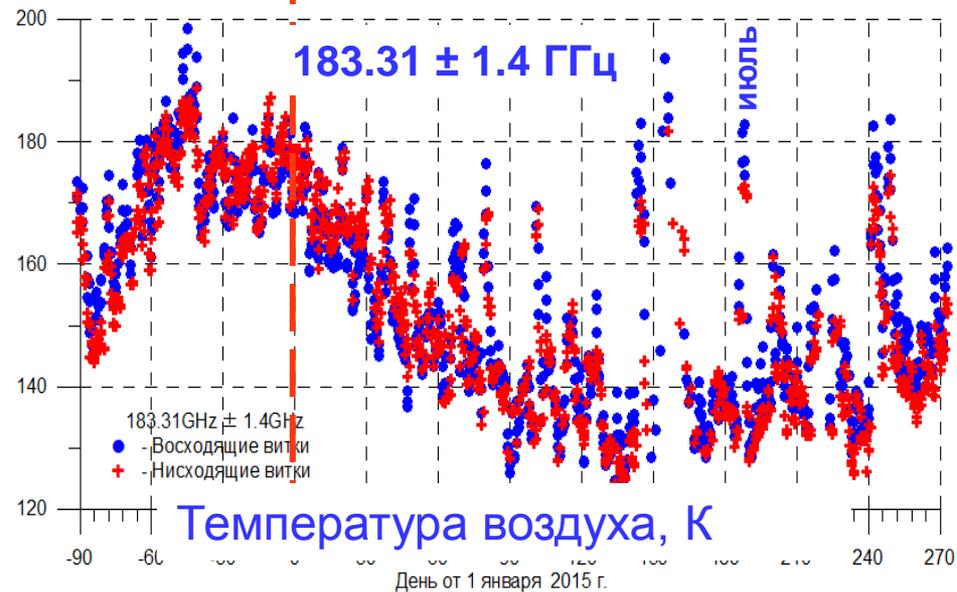
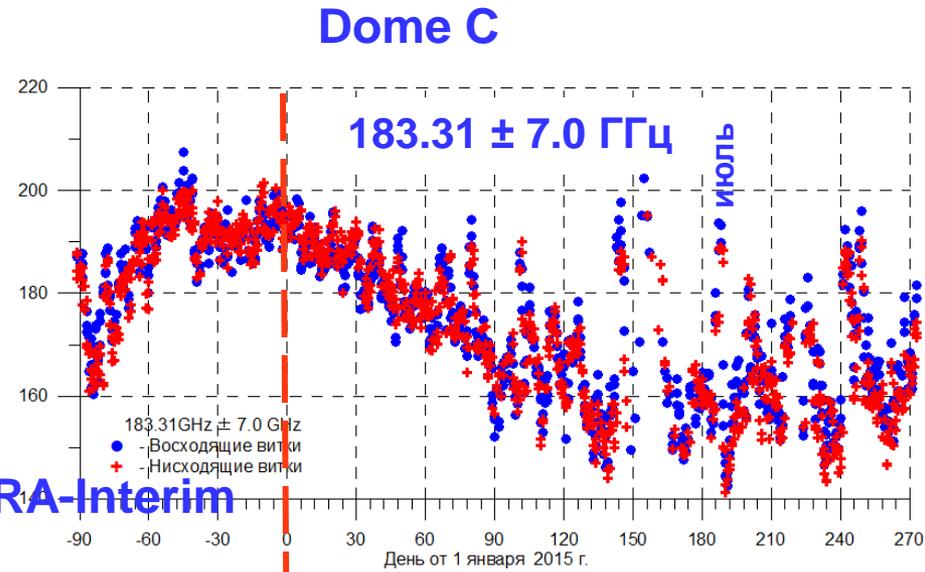
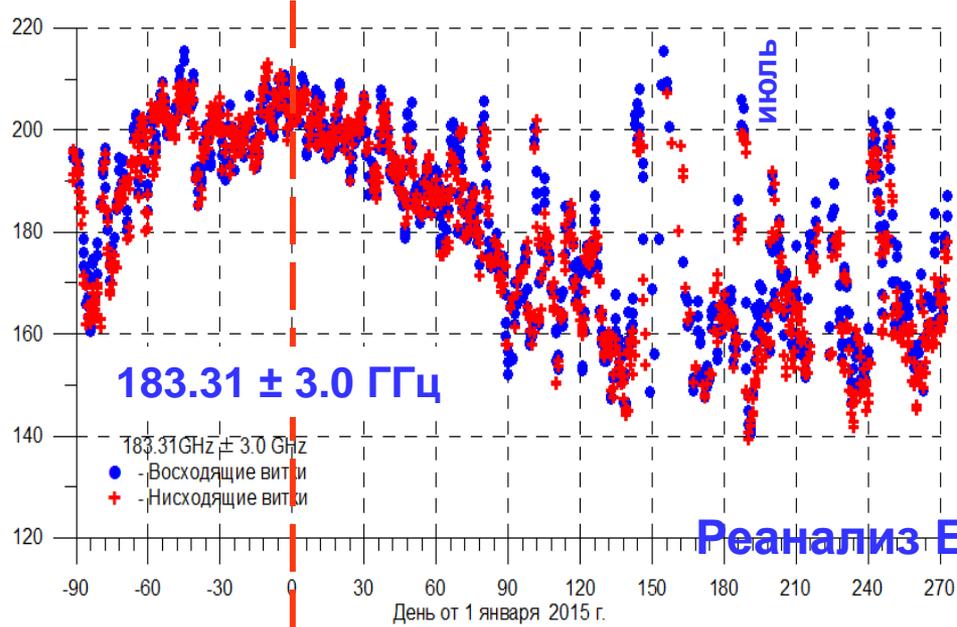


МТВЗА-ГЯ. Измерения в полосе кислорода

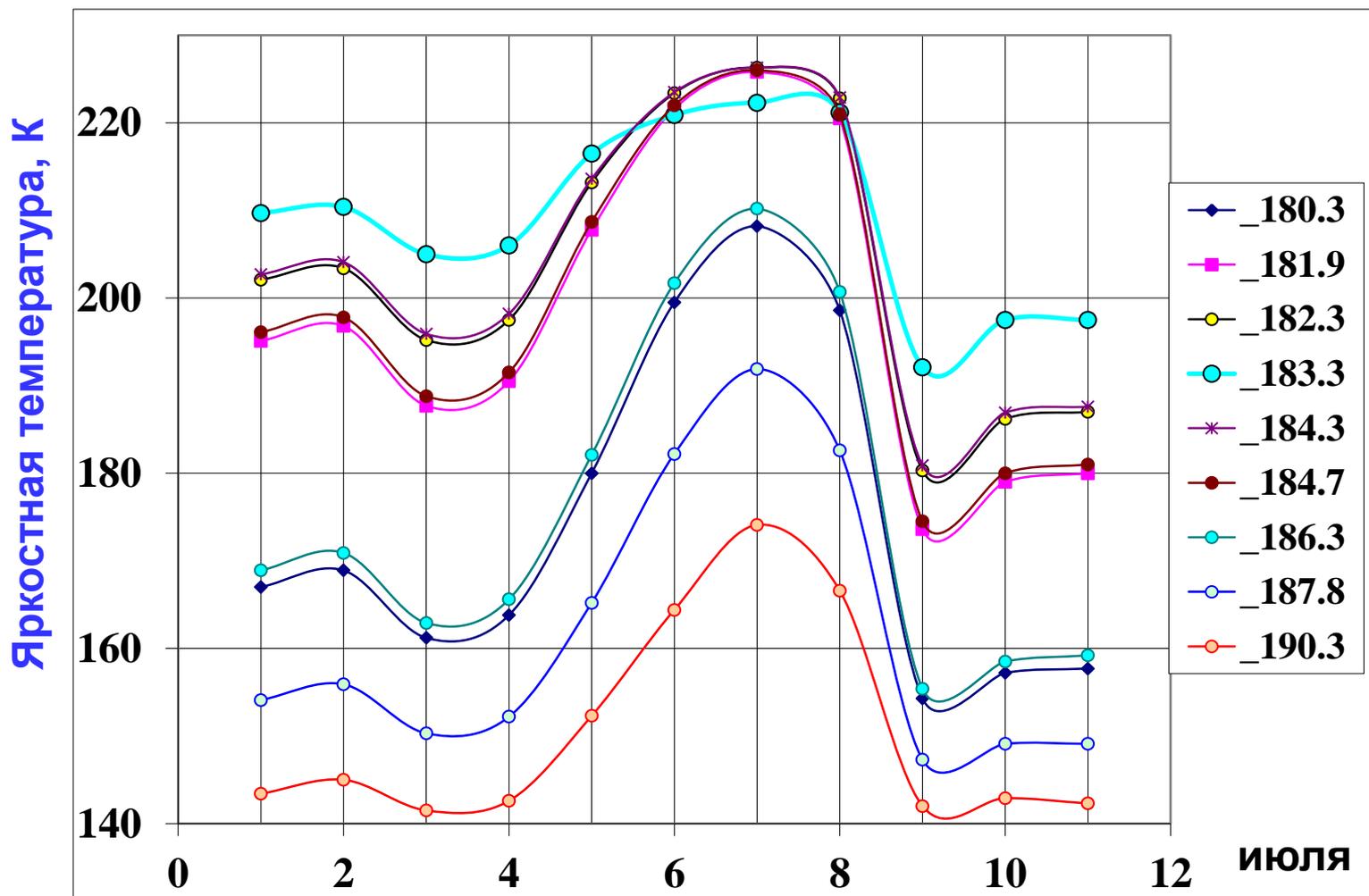


Измерения МТВЗА-ГЯ в области линии 183.31 ГГц

1 октября 2014 г.- 30 сентября 2015 г.

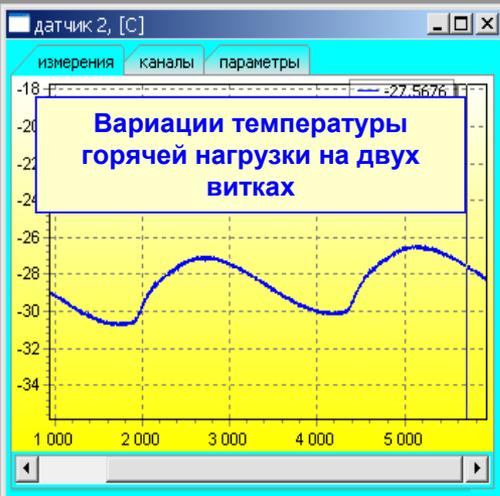


Яркостные температуры, рассчитанные по вертикальным профилям реанализа ERA-Interim за 1-11 июля 2015 г. на частотах МТВЗА-ГЯ в области линии 183.31 ГГц

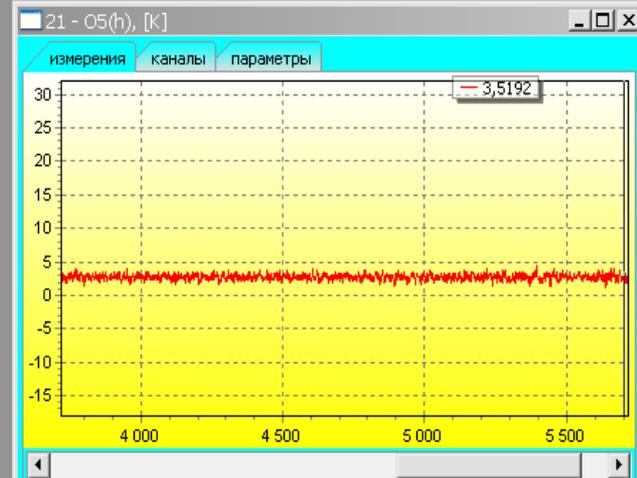
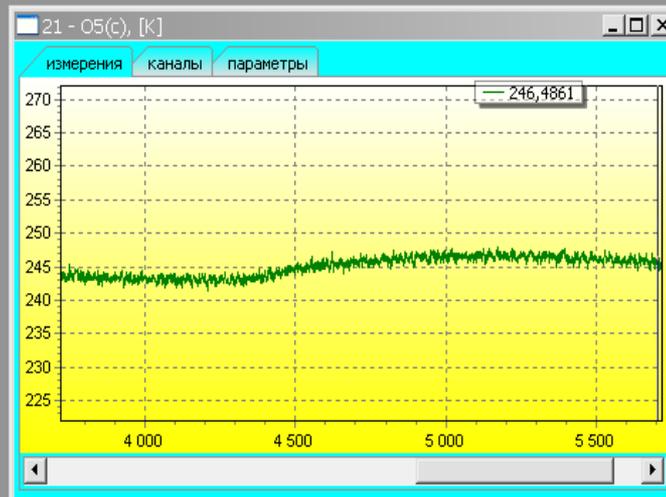
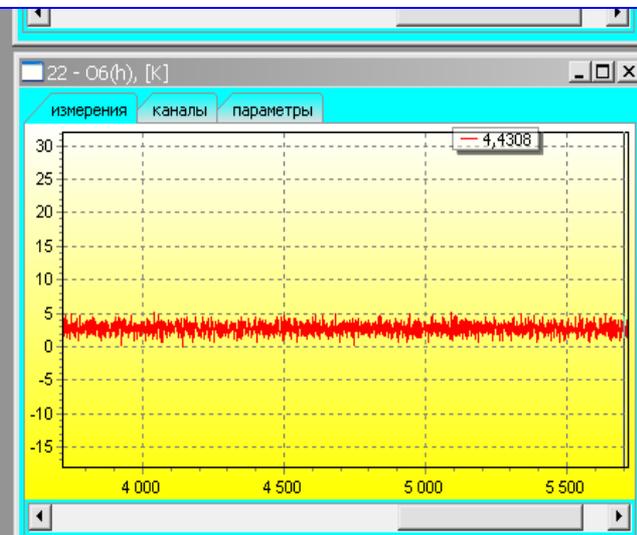
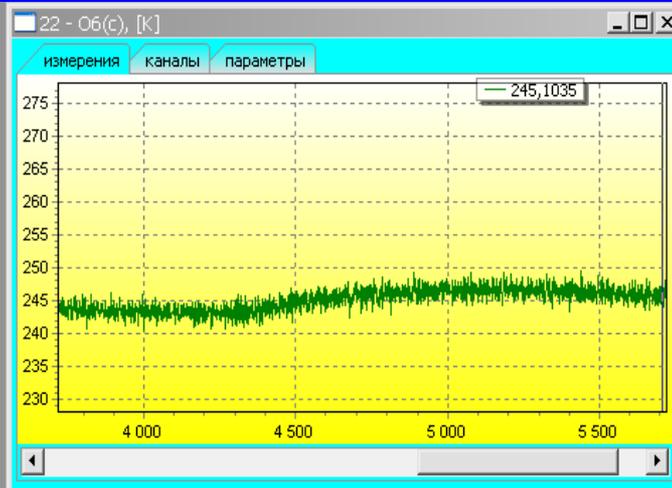


Внутренняя калибровка радиометра МТВЗА-ГЯ

$\nu = 57.2903 \pm 0.3222 \pm 0.1 \text{ GHz}$



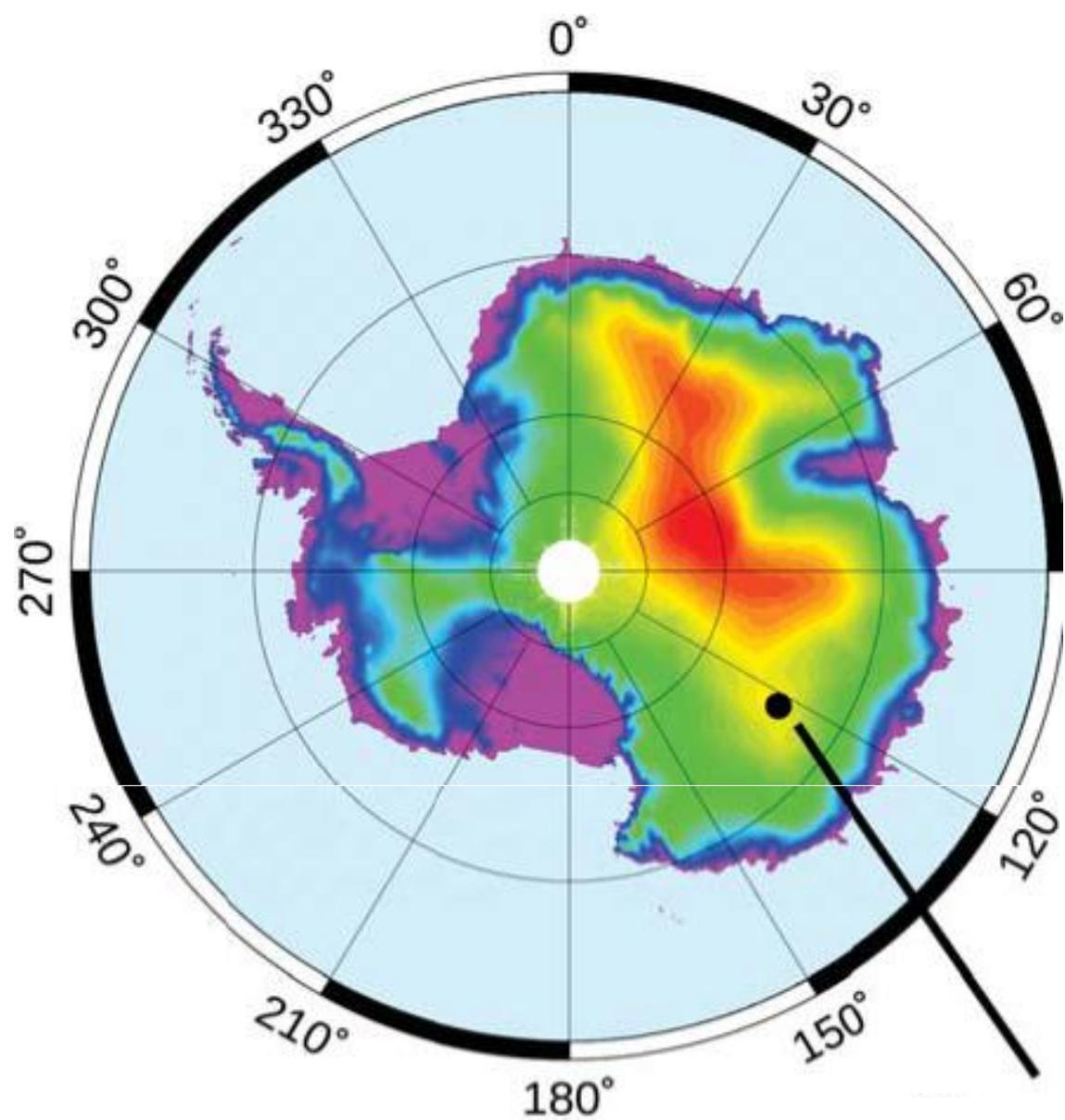
$\nu = 55.63 \text{ ГГц}$



Яркостная температура горячей согласованной нагрузки (один виток)

Яркостная температура холодного космоса (один виток)

Стабильность внутренней калибровки остается высокой на протяжении одного года



Dome C – идеальный полигон для калибровки и оценки стабильности работы микроволновых радиометров и исследования связей МВ излучения со свойствами среды.

Необходимы проекты и программы по калибровке и валидации данных радиометра МТВЗА-ГЯ.

Из предварительного анализа измерений МТВЗА-ГЯ следует, что данные зондирования могут быть применены в оперативной практике и в научной работе

29 октября из Санкт-Петербурга в Антарктику с участниками 61-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) отправилось НИС «Академик Федоров». Начальник антарктической экспедиции Валерий Лукин. Объем финансирования РАЭ сократился на 10% и составляет 1 млрд. руб. 35% - расходы в валюте: покупка топлива и других припасов, перелеты сотрудников из России и обратно, аренда самолетов, в частности, ДС-3 ВТ-67 Турбо Баслер, самолета на колесно-лыжном шасси, аналогов которому в России не выпускается с 1991 г. Сокращено внутриконтинентальное авиационное обеспечение работ РАЭ, отказались от самых дорогостоящих работ на станции «Восток», включая сезонные работы и исследования на этой станции в декабре и январе, бурение ледяной скважины над подледниковым озером. Все запланированные работы на станциях Мирный, Восток, Прогресс, Беллинсгаузен будут вестись 365 дней. В 61-й РАЭ упор сделан на морские исследования в различных районах Южного океана. Ими будут заниматься четыре судна вместо обычных трех: флагман «Академик Федоров», «Академик Александр Карпинский» и «Академик Трешников». К ним присоединится гидрографическое судно ВМС России «Адмирал Владимирский», которое 6 ноября вышло из Кронштадта. Экипаж будет заниматься гидрографическими промерами и сопутствующими океанографическими и метеорологическими наблюдениями. Его присутствие в экспедиции полностью соответствует положениям статьи 1 Договора об Антарктике 1959 г., разрешающего применение сил и средств оборонных ведомств в чисто научных, а не военных целях.

