

Модель собственного микроволнового излучения ледового щита Антарктиды

В.В. Тихонов^{1,2}, М.Д. Раев¹, Е.А. Шарков¹, Д.А. Боярский¹, М.Т. Смирнов³, Н.Ю. Комарова¹

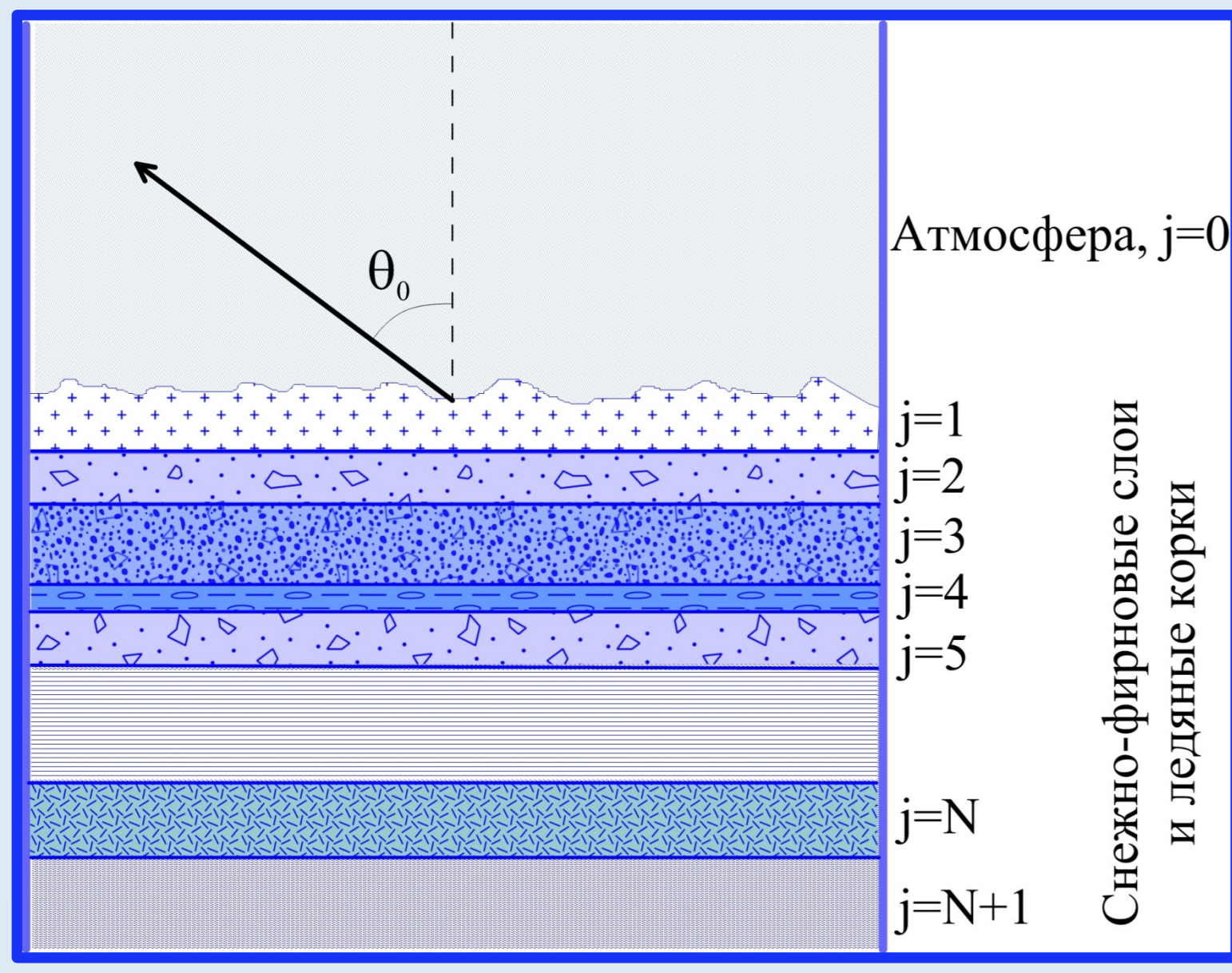
¹Институт космических исследований РАН, Москва, e-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

²Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

³ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Фрязино



Модель



$$T_{Br}^v = \sum_{j=1}^N \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \times [(1 - \exp(-2 \operatorname{Im} \psi_j)) (1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2)] +$$

$$+ 4 \frac{\operatorname{Im} \psi_j}{\operatorname{Re} \psi_j} \operatorname{Re}(r_j^- \exp(i\psi_j)) \operatorname{Im}(\exp(i\psi_j)) \times \left[\frac{|k_z|^2 - k_x^2}{|k_j|^2} \right] \frac{\operatorname{Re} Z_j}{\operatorname{Re} Z_0} + T_{N+1} |W_{N+1}|^2 \frac{\operatorname{Re} Z_{N+1}}{\operatorname{Re} Z_0}$$

$$T_{Br}^h = \sum_{j=1}^N \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \times [(1 - \exp(-2 \operatorname{Im} \psi_j)) (1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2)] +$$

$$+ 4 \frac{\operatorname{Im} \psi_j}{\operatorname{Re} \psi_j} \operatorname{Re}(r_j^- \exp(i\psi_j)) \operatorname{Im}(\exp(i\psi_j)) \frac{\operatorname{Re} Z_j}{\operatorname{Re} Z_0} + T_{N+1} |W_{N+1}|^2 \frac{\operatorname{Re} Z_{N+1}}{\operatorname{Re} Z_0}$$

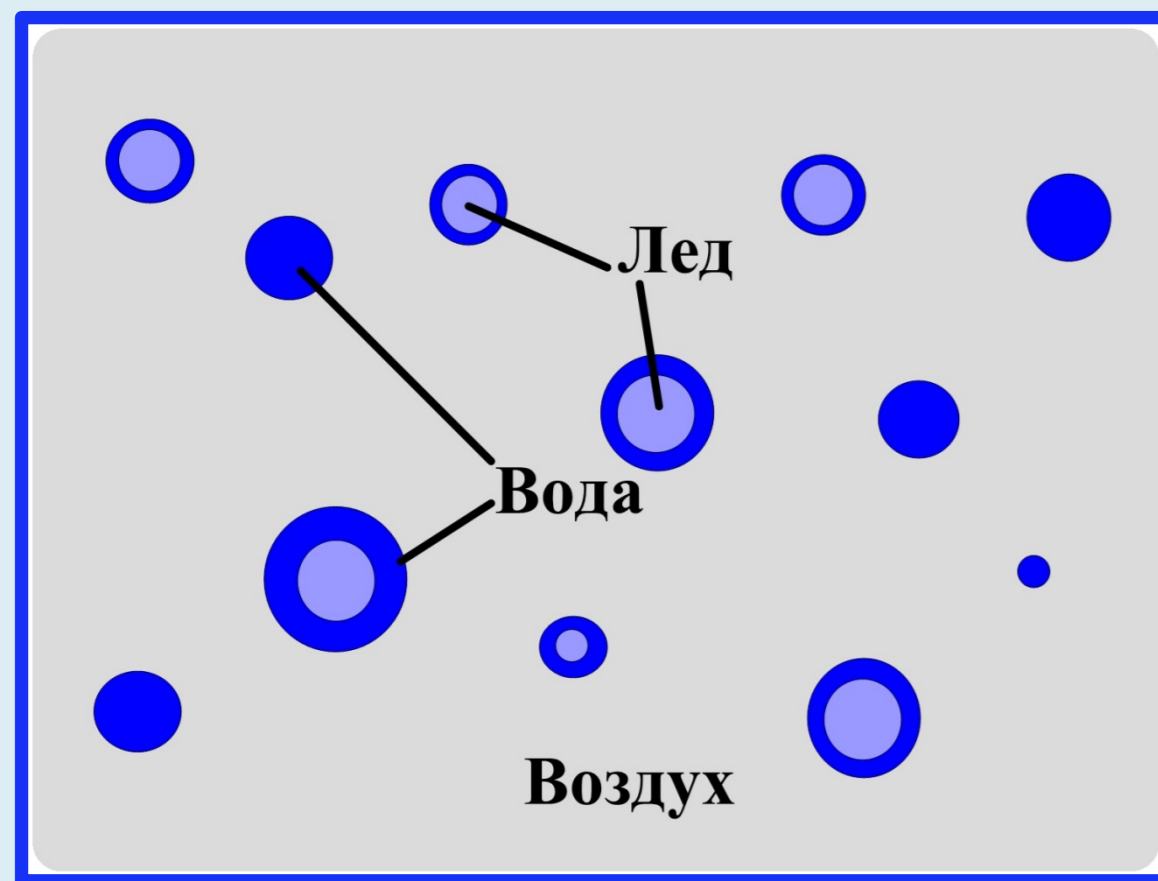
$$W_j = \prod_{m=1}^j \frac{Z_{m-1}^{in+} + Z_{m-1}^{out-} \exp(i\psi_{m-1})}{Z_{m-1}^{in+} + Z_m^{out-}}, \quad Z_j^{in+} = Z_j \frac{Z_{j-1}^{in+} - iZ_j \operatorname{tg} \psi_j}{Z_j - iZ_{j-1}^{in+} \operatorname{tg} \psi_j}, \quad Z_j^{in-} = Z_j \frac{Z_{j+1}^{in-} - iZ_j \operatorname{tg} \psi_j}{Z_j - iZ_{j+1}^{in-} \operatorname{tg} \psi_j}$$

$$\psi_j = k_z h_j, \quad k_z = k_j \cos \theta_j, \quad k_x = k_0 \sin \theta_0, \quad k_j = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon_j}}{\lambda}, \quad \cos \theta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_j - \epsilon_0 \sin^2 \theta_0}{\epsilon_j}}$$

$$r_j^+ = \frac{Z_{j-1}^{in+} - Z_j}{Z_{j-1}^{in+} + Z_j}, \quad r_j^- = \frac{Z_{j+1}^{in-} - Z_j}{Z_{j+1}^{in-} + Z_j}, \quad Z_j = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_j} \cos \theta_j} & \text{— горизонтальная поляризация} \\ \frac{\cos \theta_j}{\sqrt{\epsilon_j}} & \text{— вертикальная поляризация} \end{cases}$$

T_j - температура слоя; r_j^+ , r_j^- - коэффициенты отражения амплитуд электрического поля от верхней и нижней границы слоя, соответственно; W_j - коэффициенты пропускания по амплитуде электрического поля от внутренней стороны верхней границы слоя j на границу среды; Z_j - волновой импеданс слоя с диэлектрической проницаемостью ϵ_j ; h_j - толщина слоя. (Sharkov, 2003; Tikhonov et al., 2014).

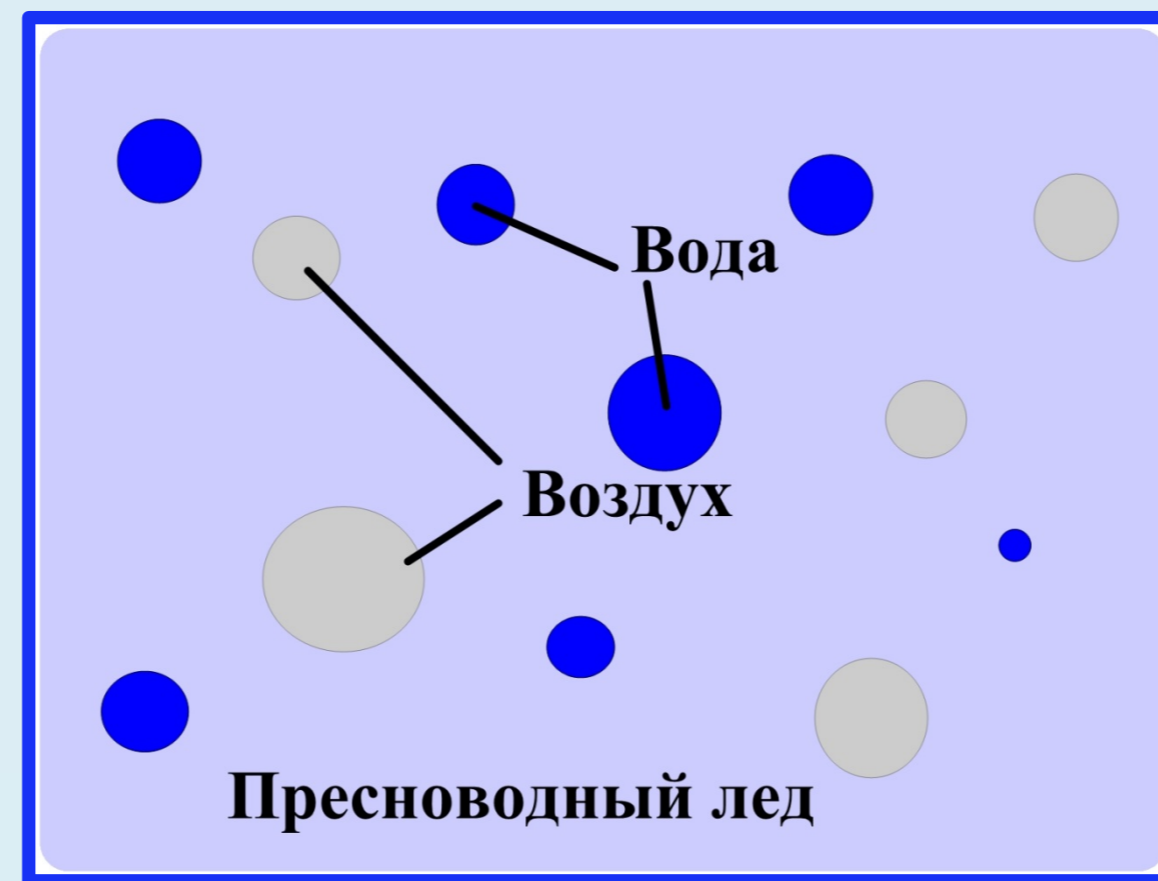
Снег, фирн



$$\epsilon_{eff}^{snow} = \epsilon_a \left[1 - \frac{4\pi n_i (\epsilon_i^w + 2\epsilon_a) \langle f_{\omega} \rangle_i}{2\epsilon_{eff} + \epsilon_i^w} - \frac{4\pi n_w (\epsilon_w + 2\epsilon_a) \langle f_{\omega} \rangle_w}{2\epsilon_{eff} + \epsilon_w} \right]^{-1}$$

k - волновое число, n_i и n_w - концентрации ледяных зерен и капель воды; ϵ_i^w - эффективное значение диэлектрической проницаемости ледяной частицы с оболочкой воды; ϵ_w - диэлектрическая проницаемость воды; ϵ_a - диэлектрическая проницаемость воздуха; $\langle f_{\omega} \rangle_i$ и $\langle f_{\omega} \rangle_w$ - усредненные по размерам амплитуды рассеяния вперед ледяной частицы с оболочкой воды, и капли воды.

Ледяные корки

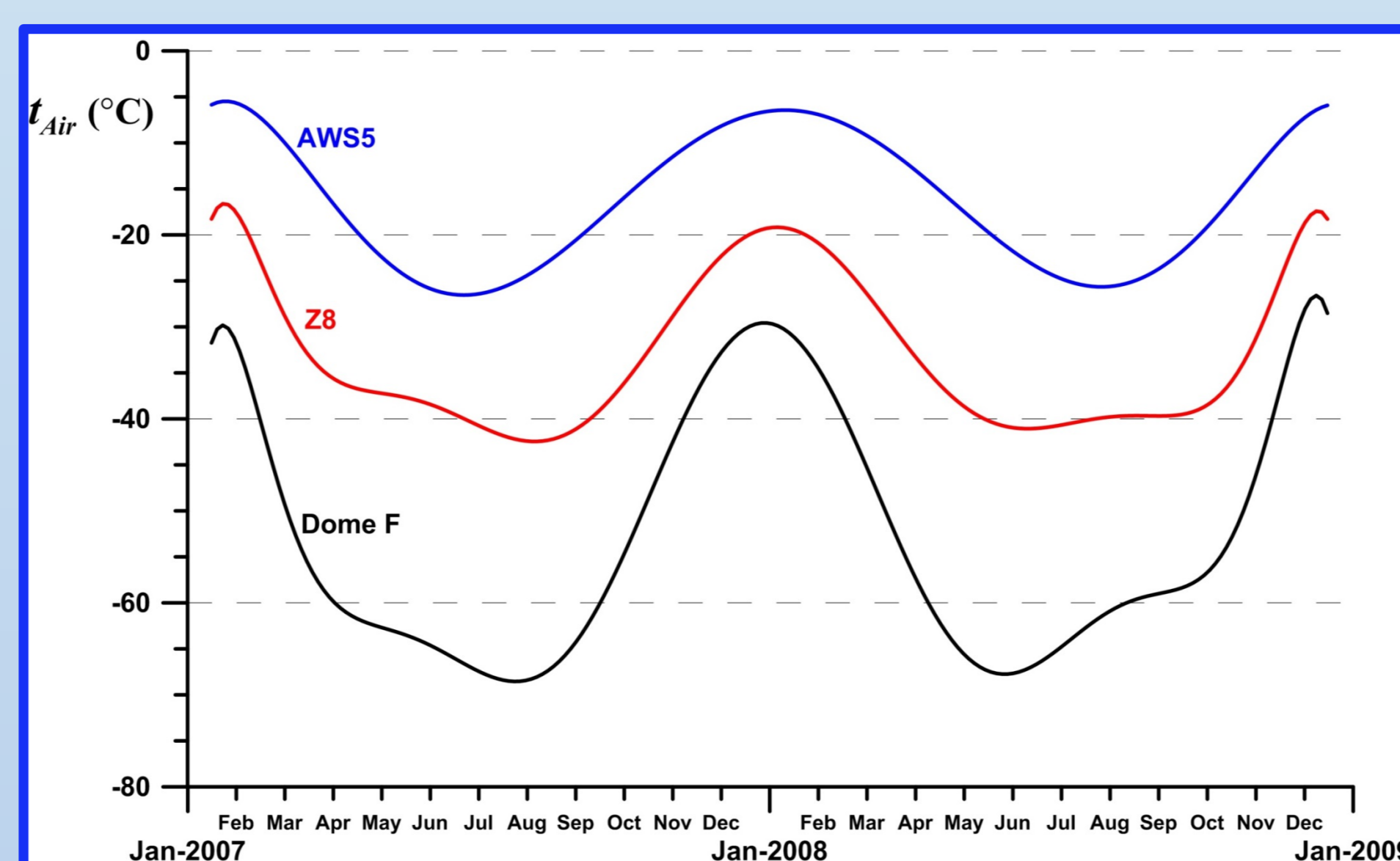


$$\epsilon_{eff}^{crust} = \epsilon_i \left[1 - \frac{4\pi n_a (\epsilon_a + 2\epsilon_i) \langle f_{\omega} \rangle_a}{2\epsilon_{eff} + \epsilon_a} - \frac{4\pi n_w (\epsilon_w + 2\epsilon_i) \langle f_{\omega} \rangle_w}{2\epsilon_{eff} + \epsilon_w} \right]^{-1}$$

k - волновое число, n_a и n_w - концентрации воздушных пор и капель воды, соответственно; ϵ_i , ϵ_a и ϵ_w - диэлектрическая проницаемость льда, воздуха и воды, соответственно; $\langle f_{\omega} \rangle_a$ и $\langle f_{\omega} \rangle_w$ - усредненные по размерам амплитуды рассеяния вперед воздушных пор и капель воды. (Boyarskii et al., 2002).

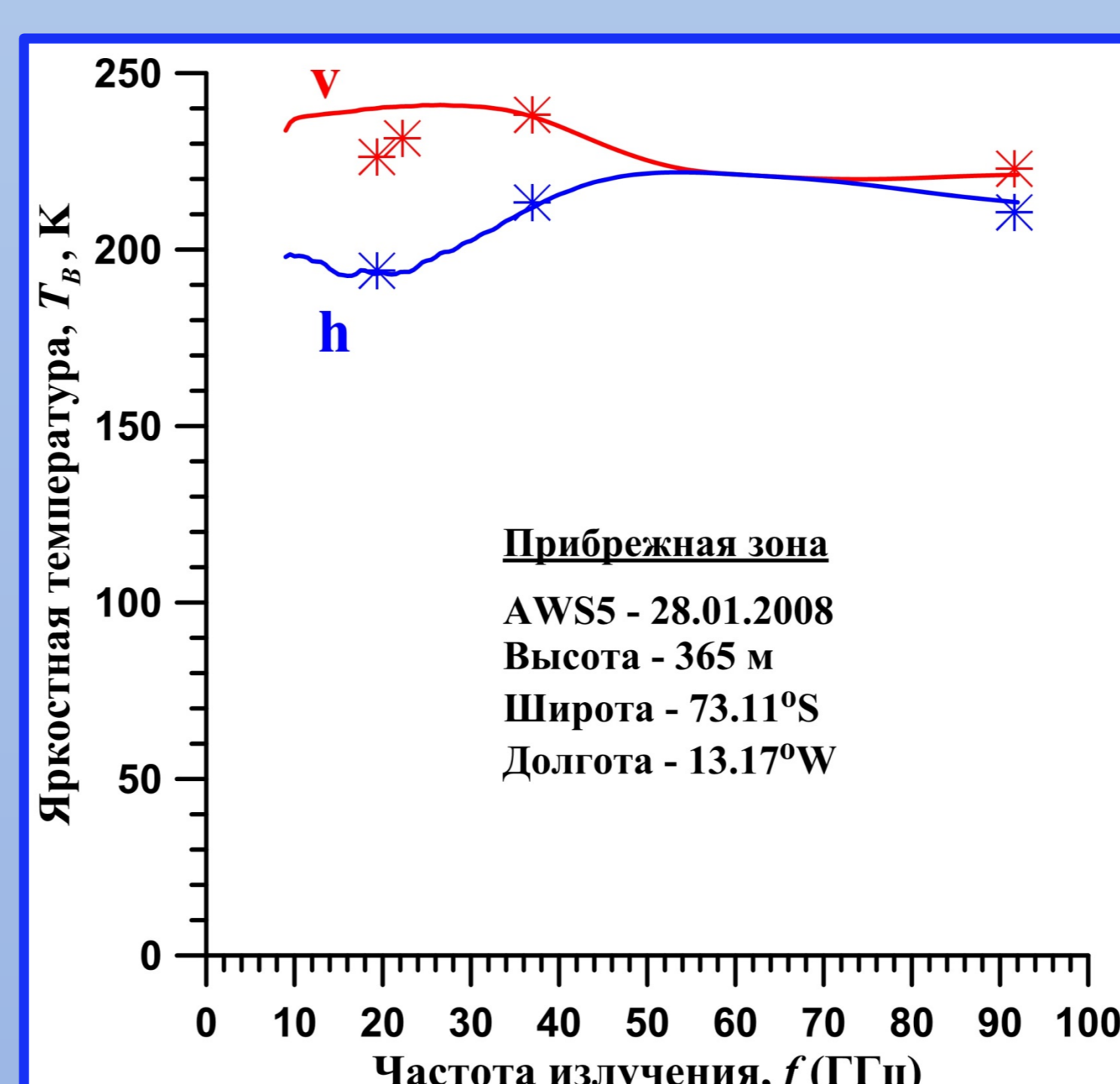
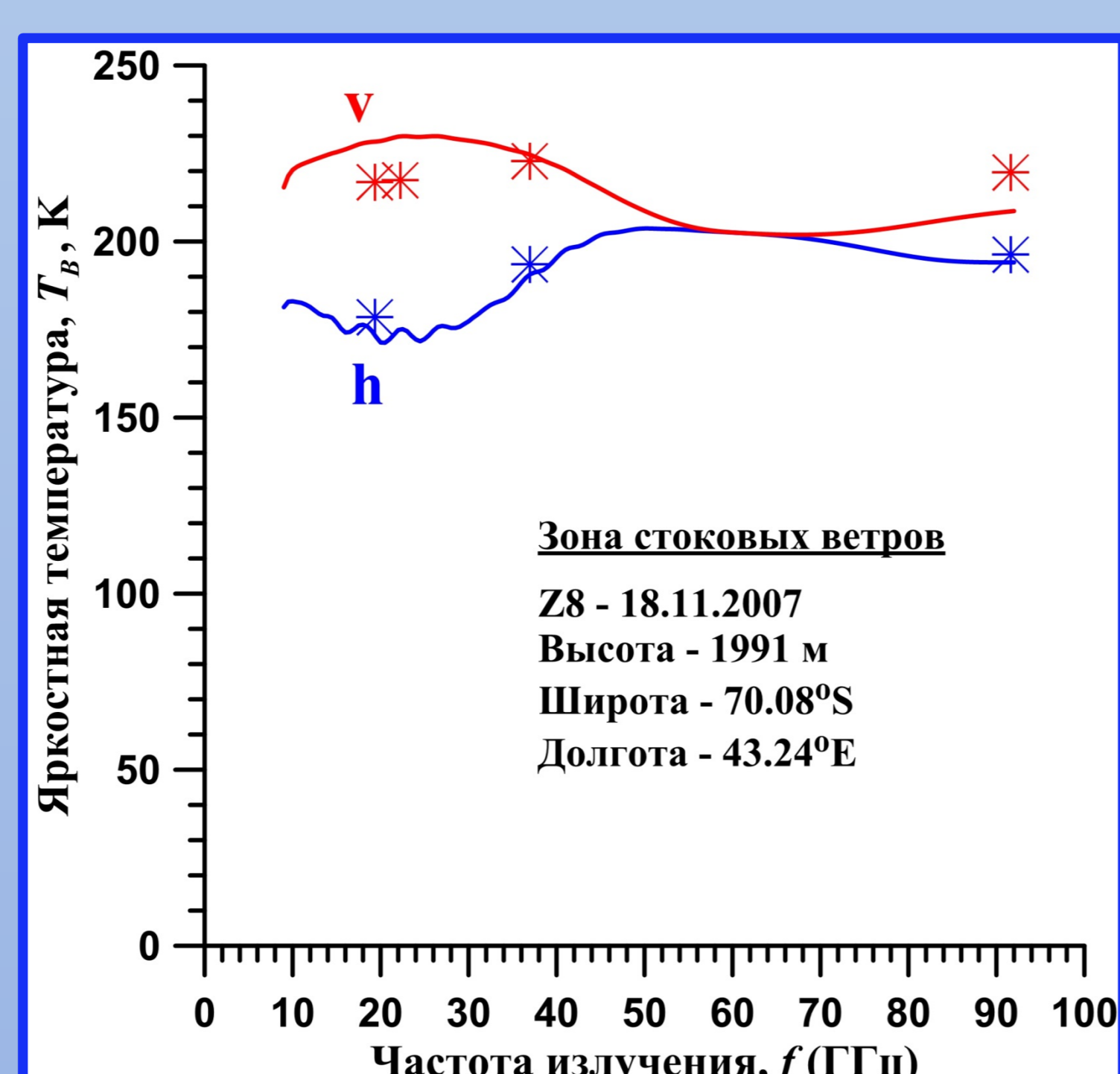
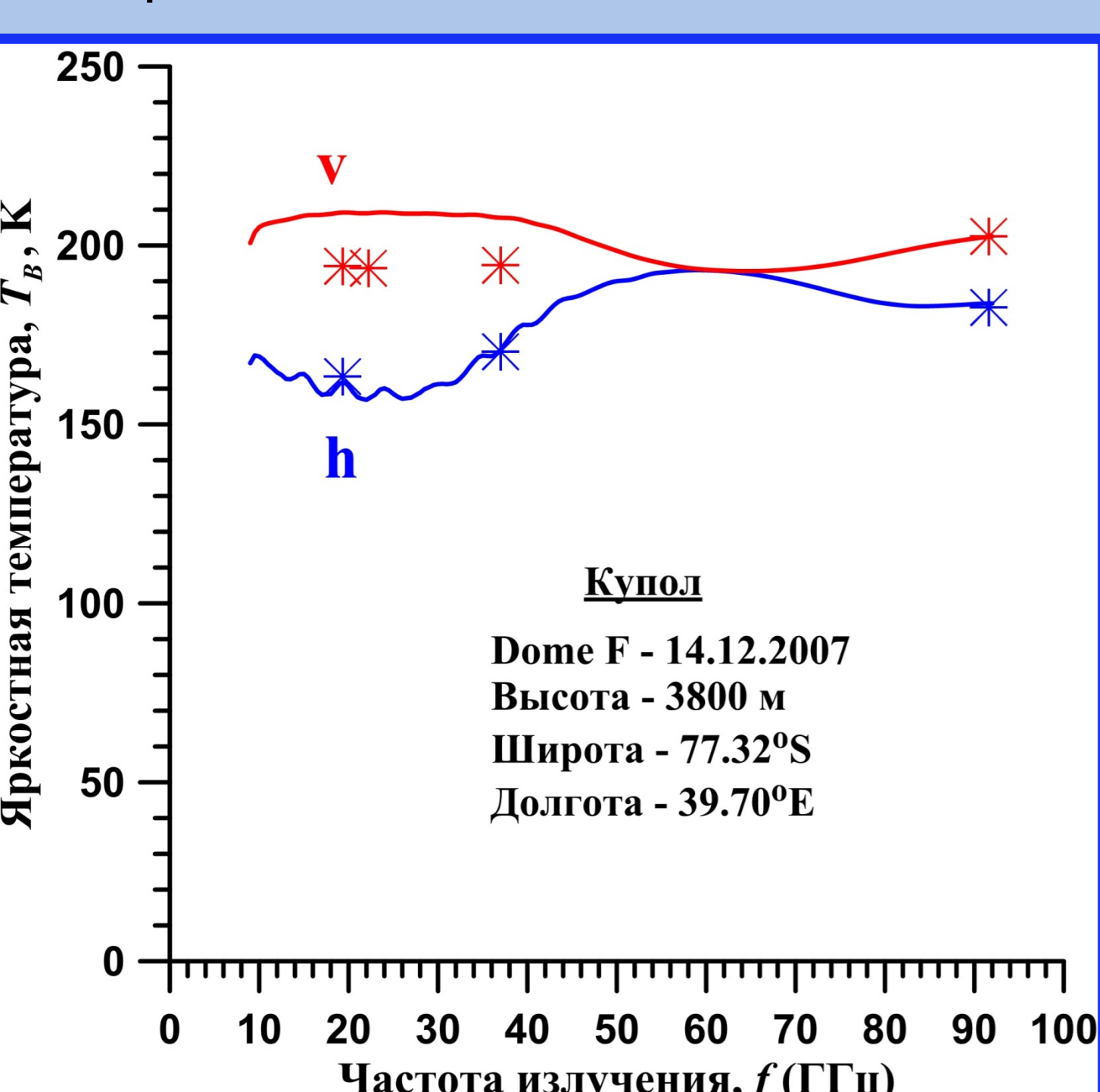
Климатические зоны и температура воздуха

Место	Широта	Долгота	Высота (м)	Зона
S16	69.03°S	40.05°E	589	Прибрежная
Z8	70.08°S	43.24°E	1991	Стоковых ветров
MD228	72.79°S	43.52°E	2960	Стоковых ветров
Dome F	77.32°S	39.70°E	3800	Купол
91B	76.05°S	22.74°E	3595	Купол
C107	74.79°S	22.89°E	3424	Купол
Kohnen	75.00°S	00.01°E	2890	Стоковых ветров
AWSS	73.11°S	13.17°W	365	Прибрежная

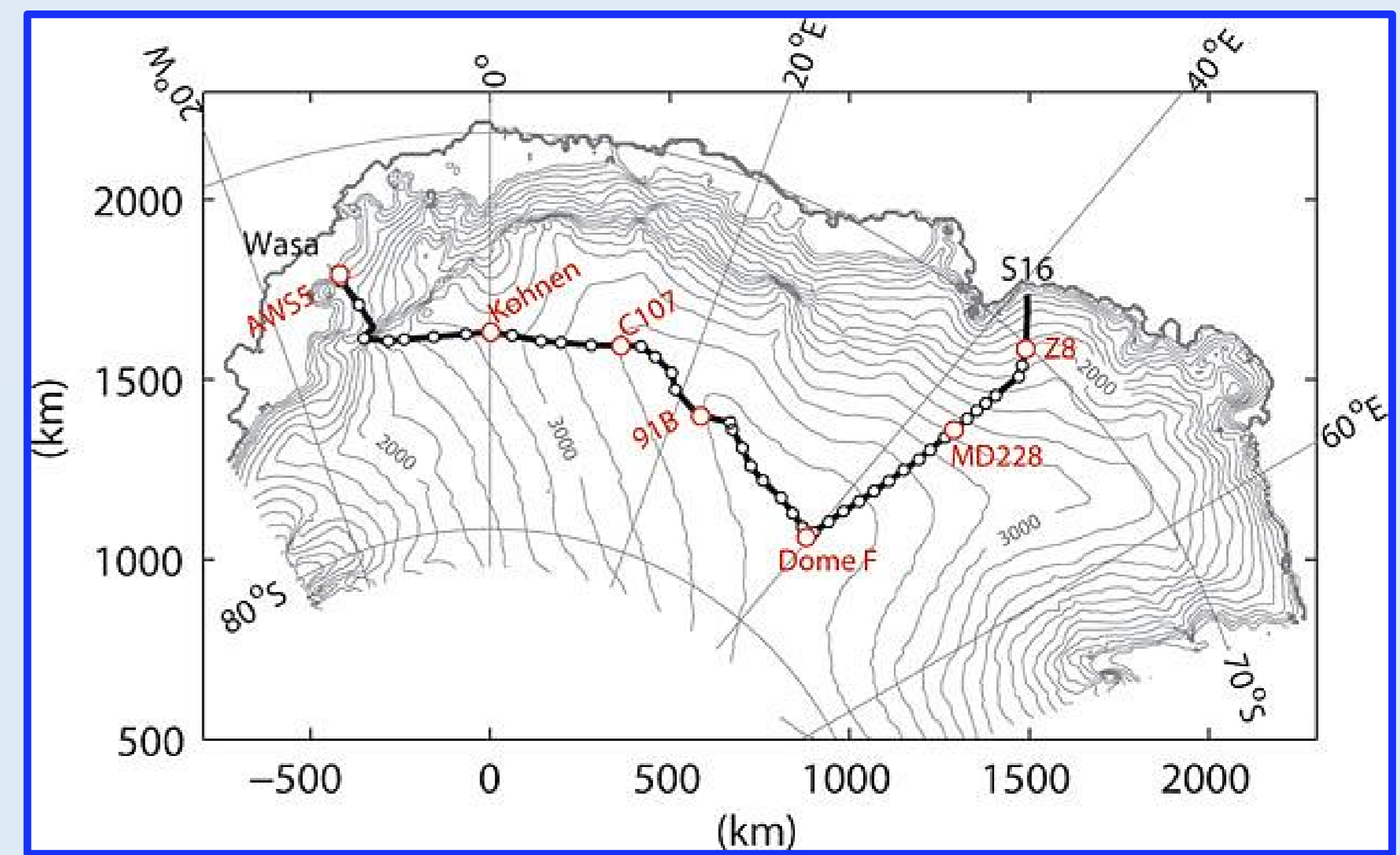


Модельный расчет и спутниковые данные

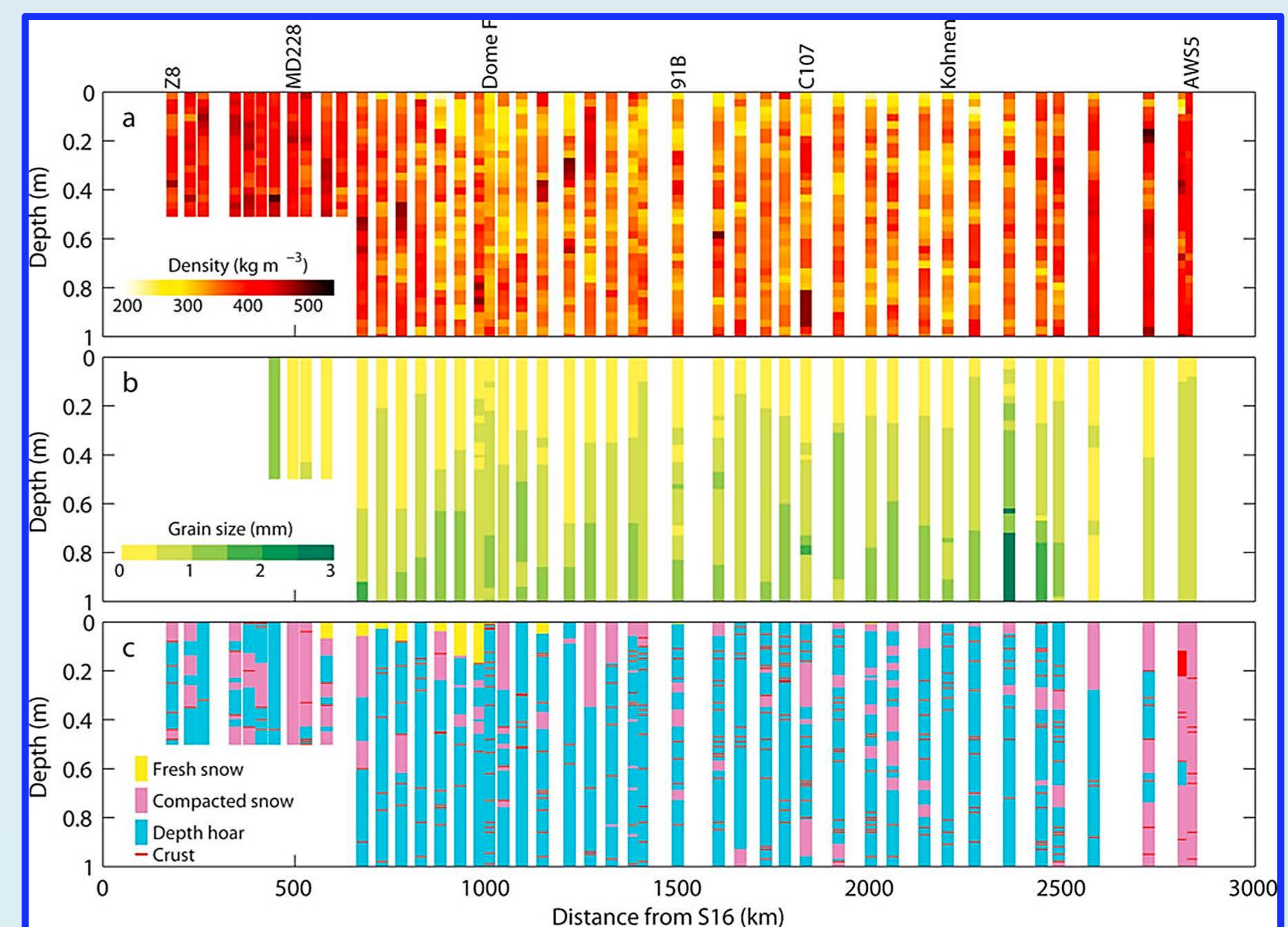
Расчеты яркостной температуры для различных зон Антарктиды, проведенные по представленным выше моделям, были сопоставлены с данными прибора SSMIS за 2007 и 2008 года для тех же пикселей, что и натурные наблюдения Шведско-Японской экспедиции. В качестве входных данных модели использовались результаты снегосъемки экспедиции. В качестве источника спутниковых данных была использована база SSMIS изображений полярных районов POLE-RT-Fields, созданная на основе разработанной в отделе «Исследование Земли из космоса» ИКИ РАН базы данных GLOBAL-RT. (Sharkov, 2003). Линии - модельный расчет, символы - данные SSMIS. Синий цвет - горизонтальная поляризация; красный цвет - вертикальная поляризация.



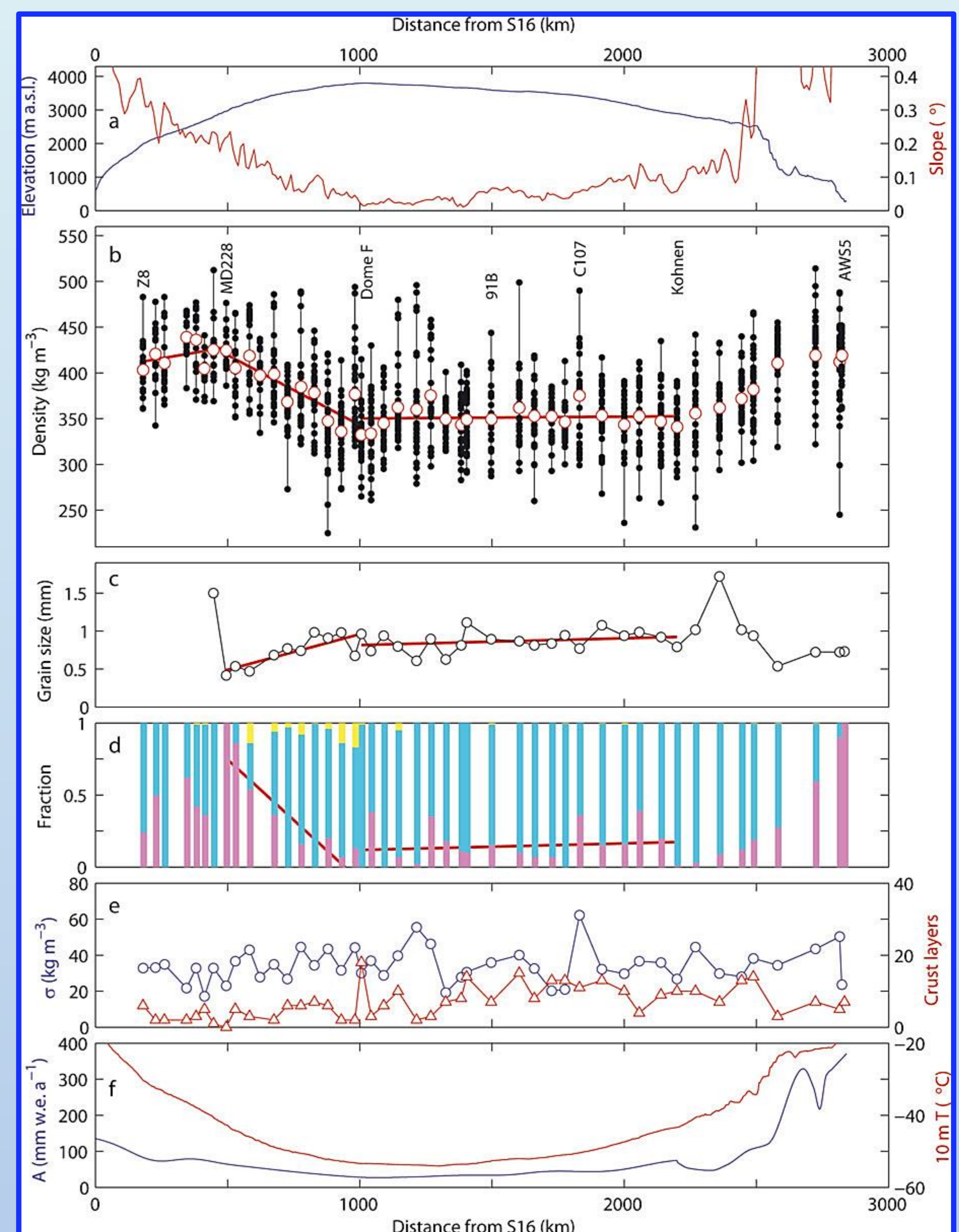
Входные параметры Модели (контактные данные)



Район и маршрут проведения Шведско-Японской экспедиции 2007/2008 годов. Земля Королевы Мод. Точками указаны места исследований структуры слоев. (Sugiyama et al., 2012).



Характеристики снежно-фирновых слоев по маршруту проведения экспедиции. (Sugiyama et al., 2012).



(a) - Высота поверхности (синий) и ее наклон (красный); (b) - плотность снега; (c) - размер ледяных зерен; (d) - доля свежего снега (желтый), глубинного инея (голубой) и уплотненного снега (пурпурный); (e) - стандартное отклонение плотности снега (синий) и частоты ледяных корок (красный); (f) - скорость накопления снега (синий) и температура снега на глубине 10 м (красный) вдоль маршрута экспедиции.

Литература:

- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Komarova N.Yu. Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing. // Progress In Electromagnetics Research. 2002. V. 35. P.251-269.
- Sharkov E.A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Springer/PRAXIS. Berlin, Heidelberg, London, New York etc. 2003. 613 p.
- Sugiyama S., Enomoto H., Fujita S., Fukui K., Nakazawa F., Holmlund P., Surdyk S. Snow density along the route traversed by the Japanese-Swedish Antarctic Expedition 2007/08. // J. of Glaciology. 2012. V. 58. № 209. P. 529-539.
- Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. Microwave Model of Radiation from the Multilayer "Ocean-atmosphere" System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions. // Progress In Electromagnetics Research B. 2014. V. 59 P. 123-133.