

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

МОДЕЛЬ СОБСТВЕННОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЕЙ АРКТИЧЕСКИХ РЕК С УЧЕТОМ ПОПАДАНИЯ  
В ПИКСЕЛЬ РАДИОМЕТРА ПОВЕРХНОСТИ СУШИ

© 2024 г. В. В. Тихонов<sup>1,2,3,\*</sup>, И. В. Хвостов<sup>2</sup>, А. Н. Романов<sup>2</sup>,  
Е. А. Шарков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

<sup>3</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.01.2024 г.

Представлена модель собственного микроволнового излучения устьевых областей арктических рек с учетом попадания в пиксель радиометра части окружающей их суши. На примере данных радиометра MIRAS спутника SMOS выполнено моделирование сезонной и межгодовой динамики яркостной температуры различных областей Енисейского залива. Показана необходимость учета береговой зоны при модельных расчетах яркостной температуры исследуемых областей. Сравнение модельных расчетов с данными продукта SMOS L1C показало их хорошее соответствие. Анализ модельных расчетов и спутниковых данных позволил определить положение зоны смешения пресных и соленых вод в Енисейском заливе в период ледостава, при условии учета в модели береговой зоны, попадающей в пиксель радиометра.

*Ключевые слова:* SMOS, яркостная температура, устьевая область, ледяной покров, береговая область, модель собственного микроволнового излучения

DOI: 10.31857/S0205961424030026, EDN: FBCWNR

## ВВЕДЕНИЕ

В ноябре 2009 г. был запущен спутник SMOS (англ. Soil Moisture and Ocean Salinity) Европейского космического агентства (ЕКА). На спутнике находится единственная полезная нагрузка — радиометр MIRAS (англ. Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) L-диапазона (1.41 ГГц). Это первый в истории космический интерферометрический радиометр. Первоначальная задача спутника SMOS состояла в измерении влажности почвы и солёности морской поверхности (McMullan et al., 2008). Однако в дальнейшем эти задачи были дополнены новыми приложениями, такими как измерение толщины морского льда и исследование ее динамики, определение состояния почвы при замерзании/оттаивании, анализ фенологических фаз замерзающих водных объектов, оценка гидрологических изменений водно-болотных угодий и т.д. (Боярский и др., 2019; Романов и др., 2018, 2023; Тихонов и др., 2022; Oliva et al., 2020; Tikhonov et al., 2018). Работа по поиску других приложений в определении параметров земных сред, улучшению алгоритмов, совершенствованию процессов калибровки и восстановлению

изображений по данным SMOS проводится и в настоящее время (Oliva et al., 2020).

Яркостная температура поверхности Земли  $T_y$  с учетом поляризации измеряется микроволновым радиометром MIRAS в диапазоне углов визирования от 0 до 60° (Kerr et al., 2010). Максимальный пространственный охват достигается при угле 42.5°. В этом случае пространственное разрешение составляет 35×65 км (Gutierrez et al., 2017). Пересчет значений из связанной с антенной системы координат ( $T_x$  и  $T_y$ ) в систему координат, связанную с  $T_y$  поверхности земли для горизонтальной (h)  $T_y^h$  и вертикальной (v)  $T_y^v$  поляризации, производится по штатным алгоритмам SMOS (Gutierrez et al., 2017) с помощью пакета SMOS-BOX версии 5.8.1 в программной среде SNAP. Данные продукта первого уровня (SMOS L1C) привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4N9. Линейный размер ячейки сетки составляет величину порядка 16 км, а площадь — около 195 км<sup>2</sup> (Sahr et al., 2003). Таким образом, значение  $T_y$  для любой ячейки сетки формируется участком подстилающей поверхности площадью от 1780 км<sup>2</sup> (по уровню 3 дБ). Получа-

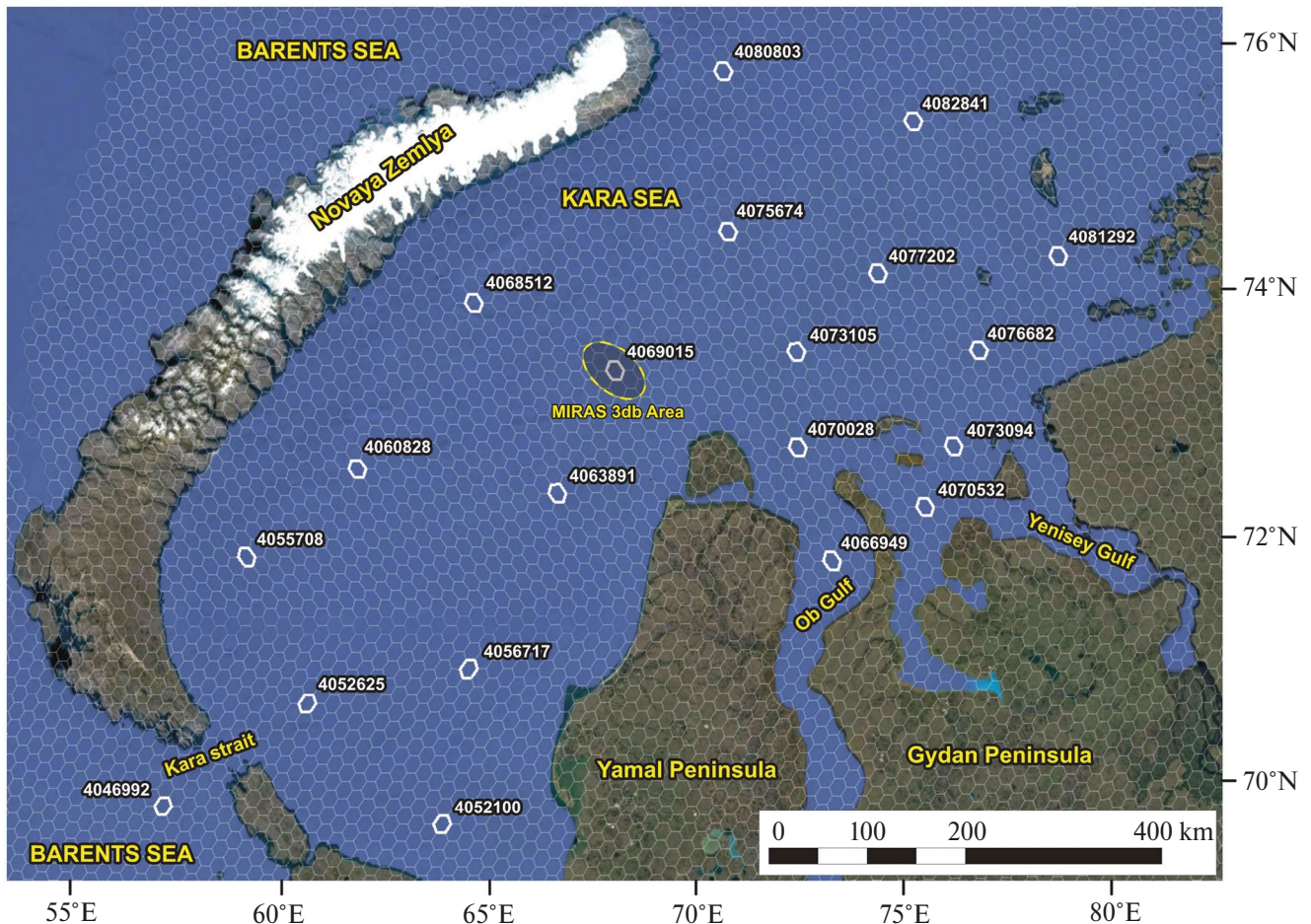


Рис. 1. Ячейки геодезической сетки DGG ISEA 4N9. В центре показан пиксель радиометра MIRAS по уровню 3 дБ (пунктирный желтый эллипс).

ется, что один пиксель радиометра MIRAS содержит в среднем порядка девяти ячеек геодезической сетки DGG ISEA 4N9. Сама же ячейка площадью 195 км<sup>2</sup> расположена в центре этого участка (рис. 1). Таким образом, если при исследовании динамики яркостной температуры водного объекта в пиксель радиометра будет попадать часть берега, этот факт необходимо учитывать при моделировании.

В работах (Тихонов и др., 2020, 2021; Tikhonov et al., 2022) представлены результаты теоретического анализа межгодовой и сезонной динамики  $T_{\text{я}}$  различных областей Обской губы по данным SMOS за период 2012–2018 гг. В исследуемой акватории было выбрано 13 ячеек продукта SMOS L1C (рис. 2а). Практически для всех выбранных ячеек пиксель радиометра MIRAS захватывал только акваторию Обской губы и не содержал береговую область. Анализ модельных расчетов и сравнение их с данными SMOS L1C показало возможность определения положения и движения зоны смещения пресных и соленых вод (фронтальной зоны) в Обской губе в период ледостава.

Выполнить подобный теоретический анализ для Енисейского залива не представлялось возможным, так как южная и центральная часть данной акватории значительно уже Обской губы, а в северной части расположено несколько крупных островов (Олений, Сибирикова, Неупокоева, Вилькицкого и др.). Таким образом, для каждой выбранной ячейки продукта SMOS L1C в Енисейском зал. (рис. 2б), в пиксель радиометра MIRAS попадала береговая область. Из-за этого сезонная и межгодовая динамика  $T_{\text{я}}$  по данным SMOS для ячеек в Енисейском заливе существенно отличалась от динамика  $T_{\text{я}}$  для ячеек Обской губы. В связи с этим авторам работы (Тихонов и др., 2022) удалось выполнить только качественный анализ этой динамики и приблизительно оценить движение и расположение фронтальной зоны в Енисейском заливе в период ледостава. Для более точного анализа движения и места расположения фронтальной зоны в Енисейском заливе в зимний период необходима доработка модели собственного микроволнового излучения акватории, в которой учитывалось бы попадание в пиксель радиометра береговой области.



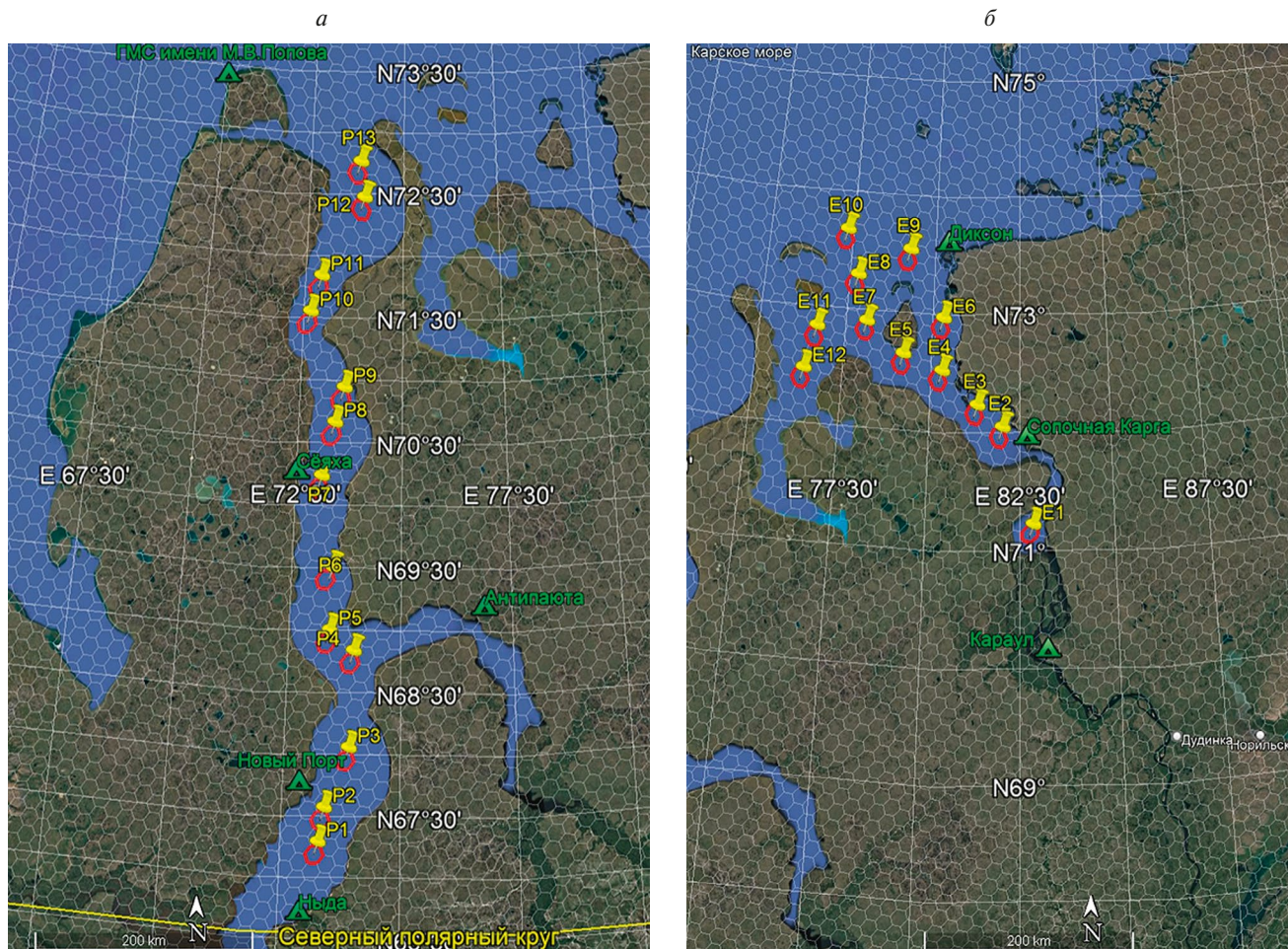


Рис. 2. Исследуемые акватории: а — Обская губа; б — Енисейский залив. Красные шестиугольники — анализируемые ячейки продукта SMOS L1C. Зелеными треугольниками обозначены действующие метеостанции.

В настоящей статье представлена модель собственного микроволнового излучения замерзающих акваторий с учетом попадания в пиксель радиометра части окружающей их суши. Исследования выполнены для различных областей Енисейского залива за период 2012–2020 гг.

### РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ И СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

Енисейский залив — это залив Карского моря, расположенный между Гыданским п-овом и п-овом Таймыр (рис. 2б). Залив имеет воронкообразную геометрию: ширина в северной части около 150 км, в районе мыса Сопочная Карга он сужается до 45 км. Длина залива до мыса Сопочная Карга порядка 225 км. Южнее Енисейский зал. сужается до 13 км в створе, образованном мысом Сопочная Карга (на правом берегу) и мысом Ошмарина (на левом берегу). Это сужение называется

“Енисейское горло”. Далее залив снова расширяется до 44 км, южнее — на 71-й параллели расположены Бреховские отмели. После них начинается дельта Енисея (Лапин, 2017). Зимой вся акватория покрывается неподвижным льдом, на севере — плавучими льдами (Брызгалов и др., 2015; Географический..., 1989).

В Енисейском зал. было выбрано 12 ячеек геодезической сетки DGG ISEA 4N9 по всей акватории (см. рис. 2б). По этим ячейкам были получены данные SMOS L1C (продукт MIR\_SCLF1C) (Gutierrez et al., 2017). Непрерывный архив данных SMOS L1C за период с 2012 г. по настоящее время хранится на серверах ЕКА.

Из исследований для достижения максимальной достоверности были исключены следующие измерения:

- 1) значения, связанные с влиянием радиочастотных помех;

2) данные с погрешностью определения  $T_{я}^h$  и  $T_{я}^v$  более 5 К;

3) данные с коэффициентом поляризации ( $T_{я}^h/T_{я}^v$ ) вне диапазона 0.01–0.99.

В результате синтезирования апертуры радиометра MIRAS и сопутствующих вычислительных преобразований на значение яркостной температуры каждой ячейки оказывает влияние излучение участков поверхности, удаленных от ее центра на сотни километров, но с несравненно меньшим весом, чем в центре. Условно принято считать границей диаграммы направленности антенны (ДНА) по уровню 3 дБ очертания эллипсов на подстилающей поверхности. Значения осей таких эллипсов составляют от 30 до 65 км и приводятся в продуктах SMOS L1C. Ориентация эллипсов меняется от витка к витку, поэтому для любой близкой к берегу ячейки в каждом конкретном измерении содержится разная доля сигнала от суши. Даже при постоянных характеристиках поверхности воды и суши измеряемые радиометром значения  $T_{я}$  в такой ячейке будут показывать “колебательную динамику”. Таким образом, для каждой конкретной ячейки Енисейского зал. ситуация разная. Нами была выполнена оценка минимальной и максимальной доли площади суши в конусе ДНА по уровню 3 дБ при различной возможной ориентации проекции ДНА на поверхности в каждой ячейке. Результаты этой оценки представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Оценка удельной площади суши в каждой ячейке продукта SMOS L1C

Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3 дБ	
	минимальная	максимальная
E01	0.38	0.46
E02	0.00	0.12
E03	0.07	0.38
E04	0.00	0.21
E05	0.07	0.40
E06	0.02	0.25
E07	0.00	0.08
E08	0.00	0.00
E09	0.00	0.01
E10	0.00	0.01
E11	0.00	0.00
E12	0.00	0.23

МОДЕЛЬ

Яркостная температура однородного участка Земли  $T_{я,y}$ , измеряемая космическим радиометром на орбите, может быть определена из уравнения переноса излучения (см., например, Шарков, 2014):

$$T_{я,y}^{h,v} = T_{пов}^{h,v} \exp(-\xi_{\theta}) + T_a + R_{пов}^{h,v} T_a \exp(-\xi_{\theta}) + R_{пов}^{h,v} T_{кос} \exp(-2\xi_{\theta}), \quad (1)$$

где  $T_{пов}$  — яркостная температура поверхности;  $R_{пов}$  — отражательная способность поверхности;  $T_a$  — яркостная температура атмосферы;  $T_{кос}$  — яркостная температура космического излучения;  $\xi_{\theta}$  — интегральное поглощение в кислороде и водяном паре.

Если в пиксель радиометра попадает подстилающая поверхность двух типов, например, акватория и прибрежная территория (рис. 3), то ее яркостную температуру на орбите Земли можно вычислить из следующего выражения (Zwally et al., 1983):

$$T_{я}^{h,v} = k T_{я\_бер}^{h,v} + (1 - k) T_{я\_яч}^{h,v}, \quad (2)$$

где  $k$  — относительная удельная площадь, занятая прибрежной территорией;  $T_{я\_бер}$  — яркостная температура прибрежной территории;  $T_{я\_яч}$  — яркостная температура центральной ячейки  $E_1$ , полностью расположенной в акватории (см. рис. 2б и 3). В свою очередь,  $T_{я\_бер}$  и  $T_{я\_яч}$  рассчитываются отдельно из выражения (1).

Для анализа сезонных вариаций яркостной температуры устьевых областей и заливов была использована модель излучения слоисто-неоднородной неизотермической среды, подробно представленная в работе (Шарков, 2014). Модель была адаптирована для случая излучающей системы “речная/морская вода – ледяной покров – снежный покров – атмосфера”.

В период ледостава излучающей системой являлась многослойная среда, представляющая собой водную поверхность (пресную или морскую), над которой расположен тонкий слой влажного льда (из-за контакта с водой), над ним слой льда (влажный или сухой в зависимости от температурных условий), покрытый снегом, а над ними — толстый слой атмосферы (рис. 4). Как показано в работе (Demir et al., 2022), такая конфигурация позволяет хорошо описать модельно собственное микроволновое излучение ледяного покрова. В зависимости от гидрологического режима моделируемой области ледяной покров может быть как пресноводным, так и морским. Яркостная температура поверхности ячейки  $T_{пов\_яч}$ , полностью расположенной в акватории, в соответствии с таким модельным представлением, определяется из следующих выражений:



$$\begin{aligned}
T_{\text{пов\_яч}}^{\text{v}} &= \sum_{j=1}^3 \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \left[ \begin{aligned} &(1 - \exp(-2\text{Im} \psi_j)) \cdot \left(1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2\right) + \\ &+ 4 \frac{\text{Im} \psi_j}{\text{Re} \psi_j} \text{Re}(r_j^- \exp(i\psi_j)) \text{Im}(\exp(i\psi_j)) \cdot \left( \frac{|k_{z_j}|^2 - k_x^2}{|k_j|^2} \right) \end{aligned} \right] \times \\
&\times \frac{\text{Re} Z_j}{\text{Re} Z_0} + T_4 |W_4|^2 \frac{\text{Re} Z_4}{\text{Re} Z_0}, \\
T_{\text{пов\_яч}}^{\text{h}} &= \sum_{j=1}^3 \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \left[ \begin{aligned} &(1 - \exp(-2\text{Im} \psi_j)) \cdot \left(1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2\right) + \\ &+ 4 \frac{\text{Im} \psi_j}{\text{Re} \psi_j} \text{Re}(r_j^- \exp(i\psi_j)) \text{Im}(\exp(i\psi_j)) \end{aligned} \right] \times \\
&\times \frac{\text{Re} Z_j}{\text{Re} Z_0} + T_4 |W_4|^2 \frac{\text{Re} Z_4}{\text{Re} Z_0},
\end{aligned} \tag{3}$$

где индекс  $j$  обозначает слои среды, слой подстилающей поверхности ( $j = 4$ ) имеет полубесконечную толщину;  $k_j$  — волновой вектор в слое  $j$ ;  $T_j$  — термодинамическая температура слоя  $j$ ;  $r_j^+$ ,  $r_j^-$  — коэффициенты отражения от верхней и нижней границы слоя  $j$  соответственно;  $\psi_j$  — на-

бег фазы волны поперек слоя  $j$ ;  $W_j$  — коэффициенты пропускания от внутренней стороны верхней границы слоя  $j$  на границу “снег — атмосфера”;  $Z_j$  — волновой импеданс слоя  $j$ . Характеристики каждого слоя, входящие в выражения (3), вычисляются из формул:

$$\begin{aligned}
W_j &= \prod_{m=1}^j \frac{Z_{m-1}^{\text{in}+} + Z_{m-1}}{Z_{m-1}^{\text{in}+} + Z_m} \exp(i\psi_{m-1}), \quad Z_j^{\text{in}+} = Z_j \frac{Z_{j-1}^{\text{in}+} - iZ_j \text{tg} \psi_j}{Z_j - iZ_{j-1}^{\text{in}+} \text{tg} \psi_j}, \quad Z_j^{\text{in}-} = Z_j \frac{Z_{j+1}^{\text{in}-} - iZ_j \text{tg} \psi_j}{Z_j - iZ_{j+1}^{\text{in}-} \text{tg} \psi_j}, \\
\psi_j &= k_{z_j} h_j, \quad k_{z_j} = k_j \cos \theta_j, \quad k_x = k_0 \sin \theta_0, \quad k_j = \frac{2\pi \sqrt{\varepsilon_j}}{\lambda}, \quad \cos \theta_j = \sqrt{\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_0 \sin^2 \theta_0}{\varepsilon_j}}, \\
r_j^+ &= \frac{Z_{j-1}^{\text{in}+} - Z_j}{Z_{j-1}^{\text{in}+} + Z_j}, \quad r_j^- = \frac{Z_{j+1}^{\text{in}-} - Z_j}{Z_{j+1}^{\text{in}-} + Z_j}, \quad Z_j = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_j} \cos \theta_j} & \text{— горизонтальная поляризация,} \\ \cos \theta_j / \sqrt{\varepsilon_j} & \text{— вертикальная поляризация,} \end{cases}
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $Z_j^{\text{in}+}$  — входной импеданс в слое  $j$  на нижней границе для волны, распространяющейся вверх;  $Z_j^{\text{in}-}$  — входной импеданс в слое  $j$  на верхней границе для волны, распространяющейся вниз;  $h_j$  — толщина слоя  $j$ ;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $\theta_0$  — угол наблюдения (см. рис. 4);  $\varepsilon_j$  — комплексная диэлектрическая проницаемость слоя  $j$ . Таким образом, собственное излучение всей системы определяется термодинамической температурой и комплексной диэлектрической проницаемостью каждого слоя.

В период открытой воды излучающей системой являлась поверхность воды (пресной или соленой).

В этом случае на рис. 4 исчезают слои 1, 2 и 3, а выражениях (3) остается только последнее слагаемое, которое представляет собой произведение излучательной способности водной поверхности на ее термодинамическую температуру, что соответствует формуле для собственного микроволнового излучения подстилающей поверхности (Ulaby, Long, 2014).

Комплексная диэлектрическая проницаемость слоев (льда и снега) определялась по квазиволновой модели эффективной диэлектрической проницаемости дисперсной среды, которая подробно

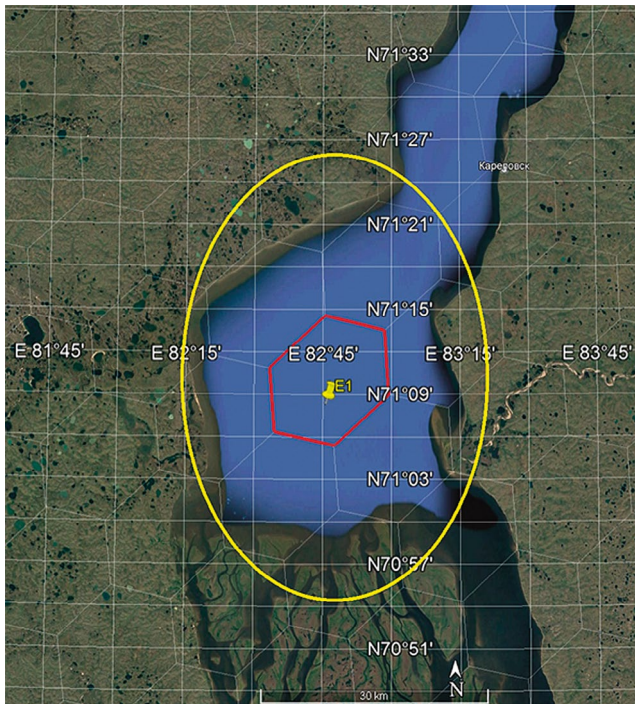


Рис. 3. Южная часть Енисейского зал. Пиксель радиометра MIRAS (желтый эллипс) с центральной ячейкой E1 (красный шестиугольник).

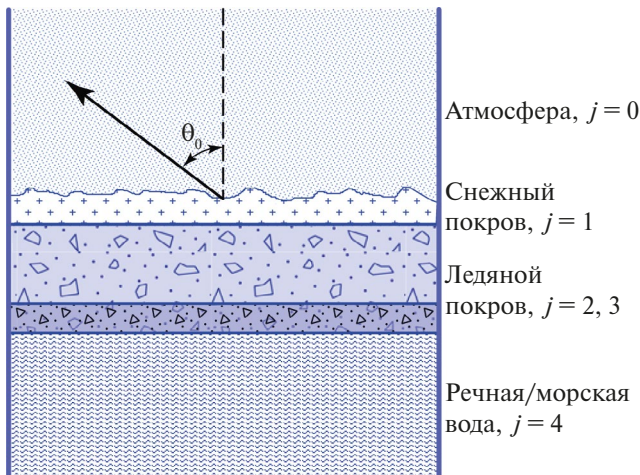


Рис. 4. Модельное представление излучающей системы “речная/морская вода – ледяной покров – снежный покров – атмосфера”.

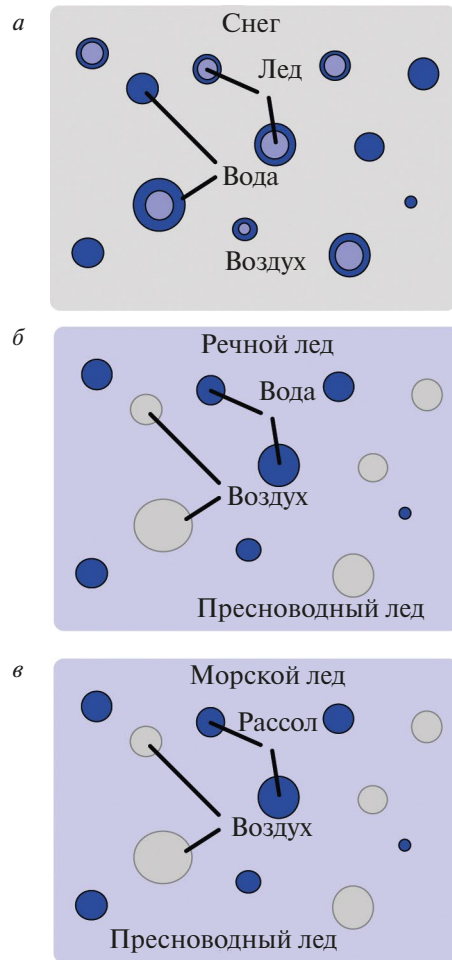


Рис. 5. Модельное представление: а – снега; б – речного льда; в – морского льда.

рассмотрена в работе (Tikhonov et al., 2018). Согласно модели: снежный покров представляется воздушной средой, содержащей сферические ледяные зерна, покрытые пленкой воды, и капли воды; речной лед – сплошной пресноводный лед, содержащий сферические включения воздуха и воды; морской лед – сплошной пресноводный лед, содержащий сферические включения воздуха и рассола (рис. 5).

Эффективная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{эф}$ , согласно таким модельным представлениям, определяется из выражений следующего вида:

для снега –

$$\epsilon_{эф}^{снег} = \epsilon_{возд} \left[ 1 - \frac{4\pi n_{лед} (\epsilon_{лед}^{вод} + 2\epsilon_{возд}) \langle f_{\omega} \rangle_{лед}}{2\epsilon_{эф}^{снег} + \epsilon_{лед}^{вод}} - \frac{4\pi n_{вод} (\epsilon_{вод} + 2\epsilon_{п.лед}) \langle f_{\omega} \rangle_{вод}}{2\epsilon_{эф}^{снег} + \epsilon_{вод}} \right]^{-1}, \quad (5a)$$

для речного льда —

$$\epsilon_{\text{эф}}^{\text{р.лед}} = \epsilon_{\text{п.лед}} \left[ 1 - \frac{4\pi n_{\text{возд}} (\epsilon_{\text{возд}} + 2\epsilon_{\text{п.лед}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{возд}}}{k^2}}{2\epsilon_{\text{эф}}^{\text{р.лед}} + \epsilon_{\text{возд}}} - \frac{4\pi n_{\text{вод}} (\epsilon_{\text{вод}} + 2\epsilon_{\text{п.лед}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{вод}}}{k^2}}{2\epsilon_{\text{эф}}^{\text{р.лед}} + \epsilon_{\text{вод}}} \right]^{-1}, \quad (56)$$

для морского льда —

$$\epsilon_{\text{эф}}^{\text{м.лед}} = \epsilon_{\text{п.лед}} \left[ 1 - \frac{4\pi n_{\text{возд}} (\epsilon_{\text{возд}} + 2\epsilon_{\text{п.лед}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{возд}}}{k^2}}{2\epsilon_{\text{эф}}^{\text{м.лед}} + \epsilon_{\text{возд}}} - \frac{4\pi n_{\text{рас}} (\epsilon_{\text{рас}} + 2\epsilon_{\text{п.лед}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{рас}}}{k^2}}{2\epsilon_{\text{эф}}^{\text{м.лед}} + \epsilon_{\text{рас}}} \right]^{-1}, \quad (57)$$

где  $k$  — волновое число;  $n_{\text{лед}}$ ,  $n_{\text{вод}}$ ,  $n_{\text{возд}}$  и  $n_{\text{рас}}$  — концентрации ледяных зерен, капель воды, частиц воздуха и капель рассола соответственно;  $\epsilon_{\text{лед}}^{\text{вод}}$  — эффективное значение диэлектрической проницаемости ледяной частицы, покрытой оболочкой воды;  $\epsilon_{\text{вод}}$ ,  $\epsilon_{\text{возд}}$ ,  $\epsilon_{\text{п.лед}}$  и  $\epsilon_{\text{рас}}$  — диэлектрическая проницаемость воды, воздуха, пресноводного льда и рассола соответственно;  $\langle f_{\omega} \rangle_{\text{лед}}$ ,  $\langle f_{\omega} \rangle_{\text{вод}}$ ,  $\langle f_{\omega} \rangle_{\text{возд}}$  и  $\langle f_{\omega} \rangle_{\text{рас}}$  — усредненная по размерам частиц амплитуда рассеяния вперед ледяной частицы с оболочкой воды, капли воды, частицы воздуха и капли рассола соответственно. Амплитуда рассеяния вперед рассчитывается по теории Ми. Предполагалось, что размеры всех включений подчинены логарифмически-нормальному распределению.

При расчетах в качестве входных параметров модели были использованы данные, полученные с ближайших к исследуемым ячейкам метеостанций (см. рис. 2б). Кроме этого привлекались среднестатистические параметры снега, пресноводного и морского льда, характерные для арктического региона (Снег, 1986; Crabeck et al., 2016; Encyclopaedia..., 2011; Frantz et al., 2019; Lepparanta, 2023; Petrich, Eicken, 2010; Timco, Frederking, 1996).

Яркостная температура поверхности прибрежной территории  $T_{\text{пов\_бер}}$  определялась из выражения для собственного микроволнового излучения подстилающей поверхности (Ulaby, Long, 2014):

$$T_{\text{пов\_бер}}^{\text{h,v}} = \chi_{\text{бер}}^{\text{h,v}} T, \quad (6)$$

где  $\chi_{\text{бер}}$  — излучательная способность прибрежной территории;  $T$  — термодинамическая температура поверхности.

Для расчета по формуле (6) яркостной температуры прибрежной территории необходимо знать излучательную способность подстилающей поверхности и ее сезонные изменения.

Прилегающие к Енисейскому зал. территории представляют собой холмистые равнины, сложенные морскими и ледниковыми отложениями, с большим количеством термокарстовых озер и болот. Эти территории полностью расположены в зоне многолетней мерзлоты. Толщина активного слоя почвы составляет величину порядка 60–90 см (Долгополова, 2018; Ran et al., 2022). Ландшафт представляет собой арктическую пустыню на севере, сменяющуюся южнее мохово-лишайниковой и кустарниковой тундрой (Географический..., 1989). В связи с этим для определения сезонных значений  $\chi_{\text{бер}}$  были использованы результаты, полученные в работах (Романов и др., 2018; Matzler, 1994). В работе (Романов и др., 2018) представлены результаты лабораторных экспериментов по определению диэлектрических свойств и излучательной способности мхов, лишайников, почв, торфа и т.п., привезенных из данного региона. Эксперименты проводились при различных температурных и влажностных характеристиках этих сред на частоте 1.4 ГГц. В другой работе (Matzler, 1994) представлены результаты многочисленных натуральных экспериментов по измерению излучательной способности различных земных поверхностей (теплые и мерзлые почвы, влажный и сухой снежный покров и т.п.), выполненных на полигонах Швейцарских Альп и Швейцарского плато. В результате компиляции этих данных были получены значения  $\chi_{\text{бер}}$ , характерные для каждого сезона (табл. 2).

**Таблица 2.** Усредненные значения излучательной способности для береговой зоны

Сезон	Излучательная способность, $\theta = 42.5^\circ$	
	v-поляризация	h-поляризация
Лето/осень	0.86	0.75
Зима	0.97	0.88
Весна	0.75	0.65
Оттепель	0.93	0.78

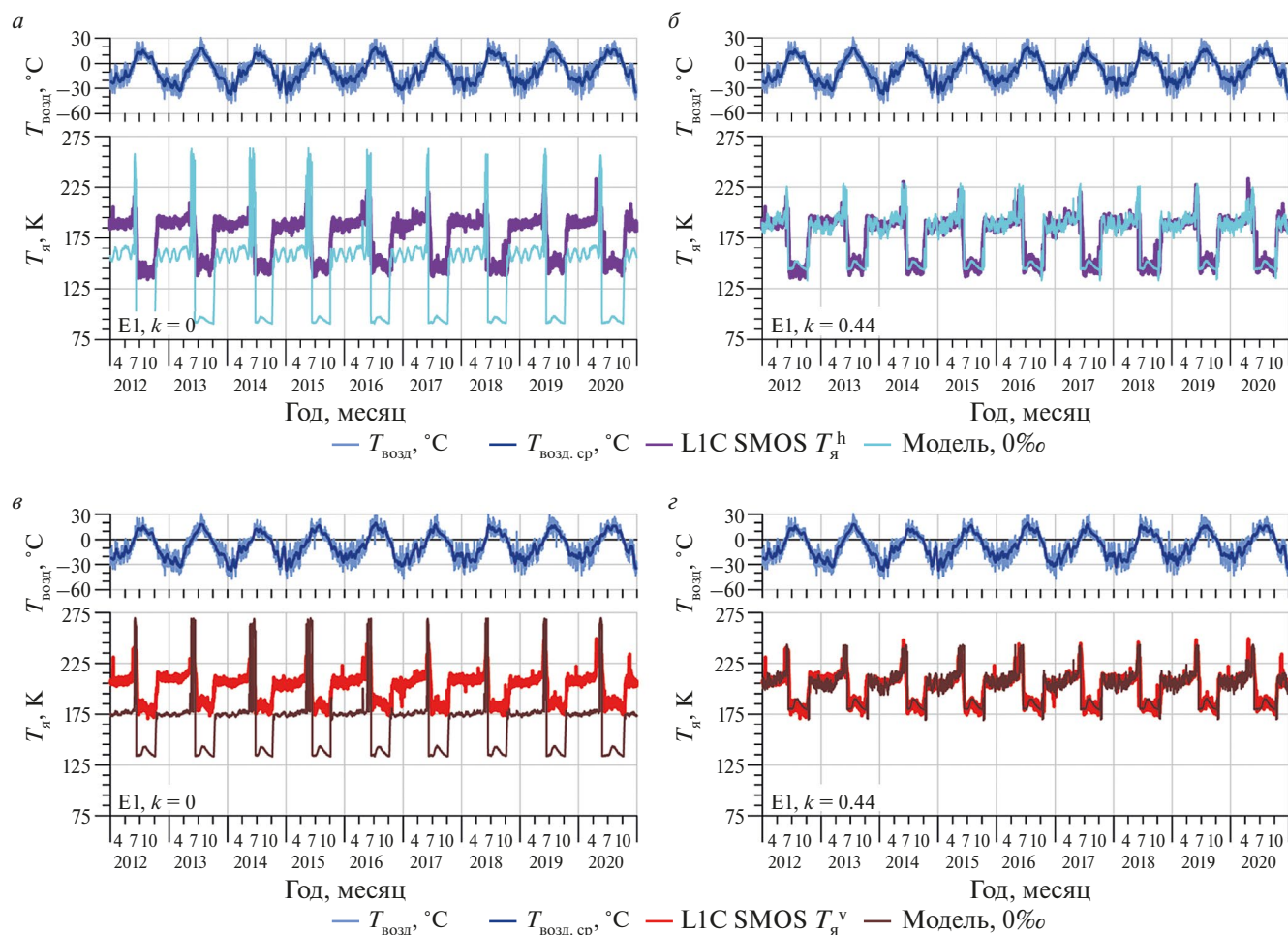


Поскольку растительность на прилегающей к Енисейскому зал. территории либо отсутствует, либо представлена сочетанием мхов и лишайников, то для диапазона 1.4 ГГц излучательная способность поверхности в летний и осенний период практически не изменяется. Зимой активный слой почвы, реки и озера промерзают насквозь, вся территория покрыта снежным покровом толщиной 30 см и более, из-за чего излучательная способность возрастает и имеет максимальные сезонные значения для этого региона. Весной после окончания процесса таяния вся территория сильно увлажняется, что и вызывает сильное уменьшение излучательной способности поверхности. Отдельно выделена ситуация, когда в зимний период наступает кратковременная оттепель. В этот момент поверхностный слой снежного покрова немного подтаивает, в нем появляется жидкая вода, вследствие чего происходит сильное увеличение излучательной способности (Tikhonov et al., 2018).

Таким образом, используя разработанные модели и полученные данные, из выражений (3) и (6) вычислялась яркостная температура поверхности акватории (ячейки) и берега ( $T_{пов\_яч}$  и  $T_{пов\_бер}$ , соответственно). Далее, используя полученные значения  $T_{пов\_яч}$  и  $T_{пов\_бер}$ , из формулы (1) определялись  $T_{я\_яч}$  и  $T_{я\_бер}$ . Из уравнения (2) с учетом разного “веса”  $k$  (см. табл. 1) для  $T_{я\_яч}$  и  $T_{я\_бер}$  вычислялась яркостная температура исследуемой области Енисейского зал. Полученные модельные расчеты сравнивались с данными продукта SMOS L1C за период 2012–2020 гг. для всех ячеек Енисейского зал. (см. рис. 2 б). Результаты этого сравнения представлены в следующем разделе.

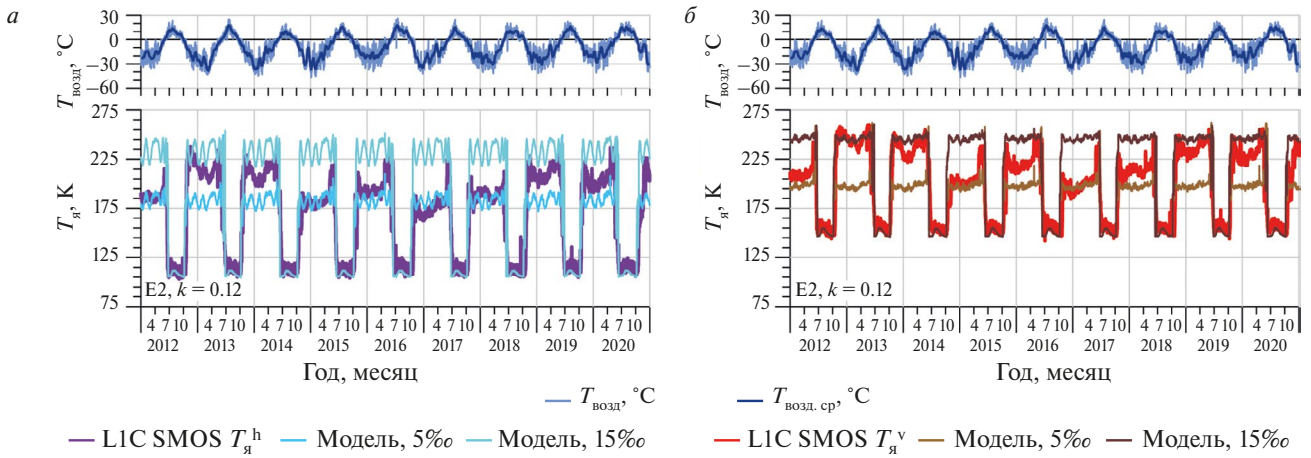
### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлено сравнение модельных расчетов яркостной температуры на горизонтальной и вертикальной поляризации с данными SMOS L1C

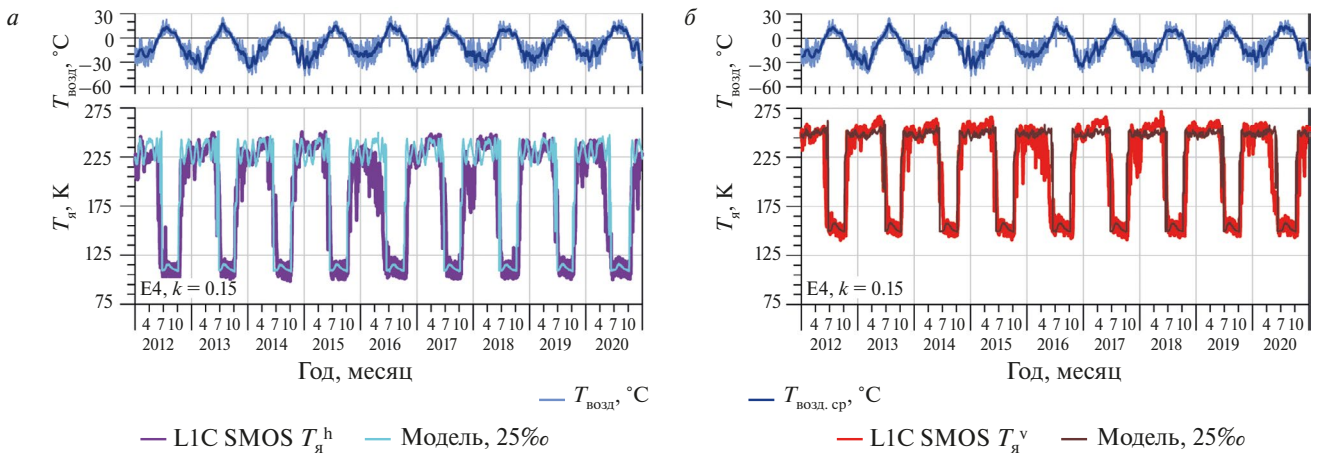


**Рис. 6.** Динамика  $T_{я}$  на горизонтальной (а, б) и вертикальной (в, з) поляризации для участка E1. Модельный расчет: а, в — без учета береговой зоны в пикселе радиометра ( $k = 0$ ); б, з — с учетом береговой зоны в пикселе радиометра ( $k = 0.44$ ). Расчет выполнен для солёности воды подо льдом 0‰. Фиолетовый и красный цвет — данные продукта SMOS L1C, голубой и коричневый цвет — модельный расчет.

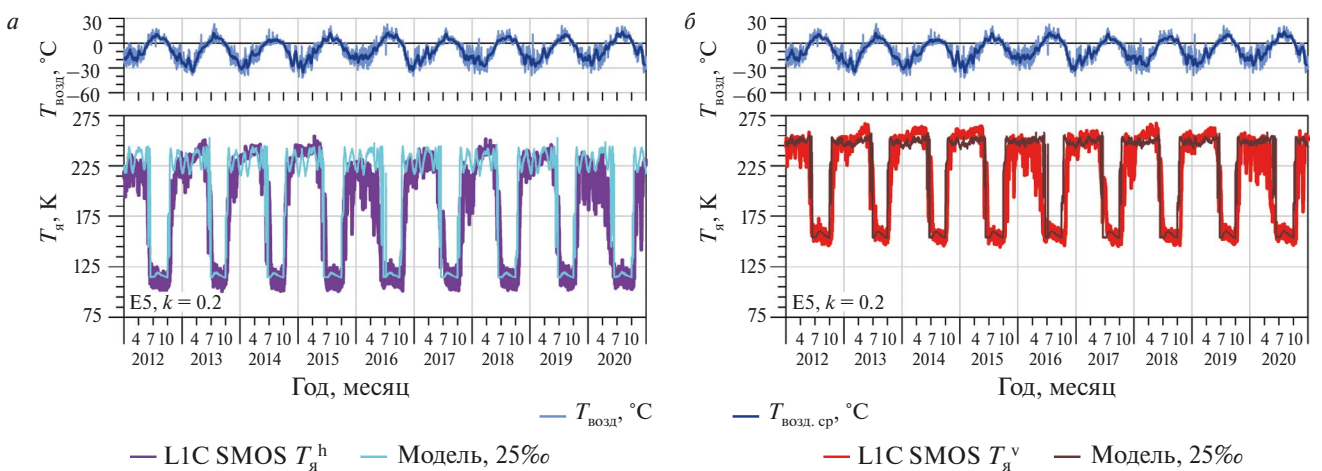




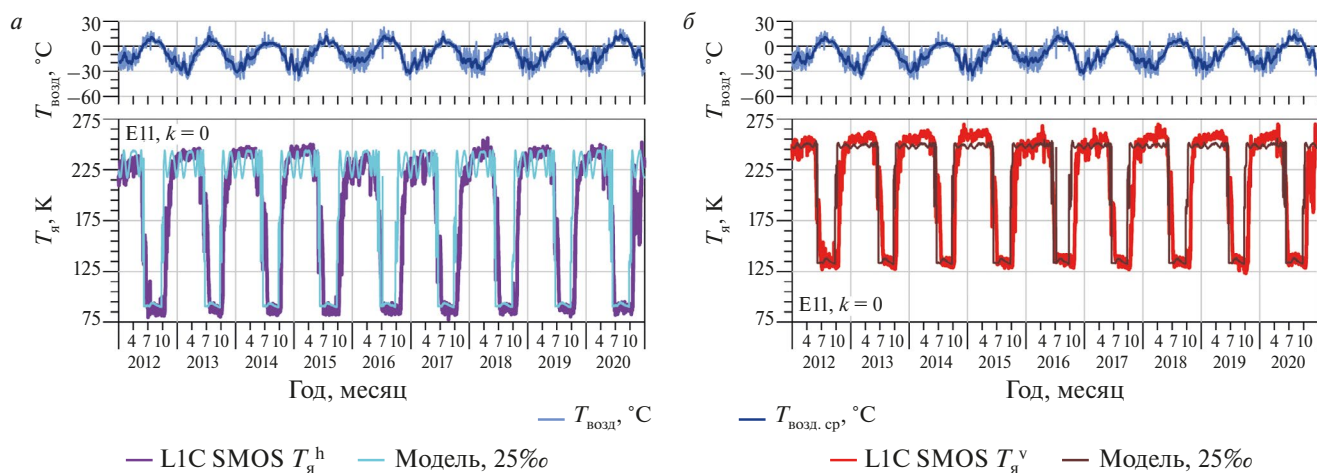
**Рис. 7.** Динамика  $T_{я}$  на горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризации для участка E2. Модельный расчет выполнен для удельной площади береговой зоны  $k = 0.12$  и солёности воды подо льдом 5 и 15‰. Фиолетовый и красный цвет — данные продукта SMOS L1C, голубой и коричневый цвет — модельный расчет.



**Рис. 8.** Динамика  $T_{я}$  на горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризации для участка E4. Модельный расчет выполнен для удельной площади береговой зоны  $k = 0.15$  и солёности воды подо льдом 25‰. Фиолетовый и красный цвет — данные продукта SMOS L1C, голубой и коричневый цвет — модельный расчет.



**Рис. 9.** Динамика  $T_{я}$  на горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризации для участка E5. Модельный расчет выполнен для удельной площади береговой зоны  $k = 0.2$  и солёности воды подо льдом 25‰. Фиолетовый и красный цвет — данные продукта SMOS L1C, голубой и коричневый цвет — модельный расчет.



**Рис. 10.** Динамика  $T_{я}$  на горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризации для участка E11. Модельный расчет выполнен для удельной площади береговой зоны  $k = 0$  и солёности воды подо льдом  $25\text{‰}$ . Фиолетовый и красный цвет — данные продукта SMOS L1C, голубой и коричневый цвет — модельный расчет.

для участка E1. Расчет выполнен для двух случаев: при  $k = 0$  (без учета берега) и при  $k = 0.44$  с учетом попадания в пиксель береговой зоны. Выбранное значение  $k = 0.44$  соответствует данным, представленным в табл. 1. Модельный расчет выполнен для солёности воды подо льдом равной  $0\text{‰}$ , что соответствует реальным гидрологическим условиям данной области (Лапин, 2017; Тихонов и др., 2022). Рисунок б хорошо демонстрирует необходимость учета берега, попадающего в пиксель радиометра, при модельных расчетах яркостной температуры исследуемых участков. Особенно это заметно для весенне-летнего периода, когда сходит снежный и ледяной покров — яркостная температура открытой водной поверхности сильно отличается от яркостной температуры поверхности берега (тундровая растительность, открытая почва, болота). В зимний период различие в значениях коэффициента излучения мхов, лишайников, замёрзшей поверхности земли, покрытой снежным покровом, и ледяного покрова акватории значительно меньше (Романов и др., 2018; Emery, Camps, 2017; Ulaby, Long, 2014).

На рис. 7–10 представлены результаты расчета еще для четырех ячеек в Енисейском зал. (E2, E4, E5 и E11). Для участка E2 (см. рис. 7) расчет выполнялся при  $k = 0.12$ , что соответствует значениям табл. 1. Для данного участка вычисления проводились при двух значениях солёности под ледяным покровом:  $5$  и  $15\text{‰}$ . В данной области, в районе мыса Сопочная Карга (см. рис. 2б), в зимний период находится зона смешения пресных и соленых вод (Лапин, 2017). Поэтому солёность в этой области подо льдом очень нестабильна от сезона к сезону и определяется величиной зимнего стока Енисея и динамикой вод Карского моря. Модельные расчеты это хорошо подтверждают. Например, в зимний

период 2014/15 гг. солёность воды подо льдом была  $5\text{‰}$ , а в зимний период 2012/13 г. — практически все время  $15\text{‰}$ .

Ячейки E4, E5 и E11 находятся в области, которая подвержена сильному влиянию вод Карского моря. Здесь солёность воды подо льдом находится в районе  $22\text{--}27\text{‰}$  (Коник и др., 2021), что хорошо подтверждается модельным расчетом, выполненным для солёности воды  $25\text{‰}$ . Пиксель ячейки E4 может захватывать, согласно табл. 1, от  $0$  до  $21\%$  береговой зоны. Модельный расчет динамики  $T_{я}$  для ячейки E4 был выполнен при  $k = 0.15$  (см. рис. 8).

Пиксель, в котором расположена ячейка E5, может захватывать, согласно табл. 1, от  $7$  до  $40\%$  берега. Модельный расчет динамики  $T_{я}$  для ячейки E5 был выполнен при  $k = 0.2$  (см. рис. 9). На участке E5 в зимний период практически всегда присутствует стабильный ледяной покров. Вариации  $T_{я}$  в период ледостава обуславливаются колебаниями температуры воздуха.

Ячейка E11 расположена далеко от берега (см. рис. 2б) и он уже не влияет на изменение яркостной температуры ячейки. Модельный расчет для этой области был выполнен при  $k = 0$  (см. рис. 10). Из рисунка видно, что модельный расчет хорошо соответствует данным продукта SMOS L1C.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что разработанная модель может с успехом применяться для интерпретации данных спутниковой микроволновой радиометрии прибрежных областей арктических морей и устьев арктических рек. Полученные результаты могут быть использованы для оценки



гидрологического режима прибрежных акваторий Арктики в зимнее время, а также климатических изменений прилегающих территорий по данным спутниковой микроволновой радиометрии.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке темы “Мониторинг” (гос. регистрация № 122042500031-8) (Тихонов В.В., Шарков Е.А.), а также темы “Природные и природно-хозяйственные системы Сибири в условиях современных вызовов: диагностика состояний, адаптивные возможности, потенциал экосистемных услуг” (госзадание № FUFZ-2021-0007) (Хвостов И.В., Романов А.Н.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боярский Д.А., Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е.А.* Оценка глубины промерзания почвенного покрова по данным спутника SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 2. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-13>.
- Брызгалов В.А., Никаноров А.М., Косменко Л.С., Решетняк О.С.* Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Ростов н/Д: ЮФУ, 2015. 164 с.
- Географический энциклопедический словарь. Географические названия / под ред. Трешникова А.Ф. М: Советская энцикл., 1989. 592 с.
- Долгополова Е.Н.* Роль многолетнемерзлых пород в формировании гидролого-морфологического режима устьев рек водосбора Северного Ледовитого океана // Арктика: экология и экономика. 2018. Т. 32. № 4. С. 70–85. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-70-85.
- Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Педченко А.П.* Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 241–250.
- Лапин С.А.* Особенности формирования пресноводного стока в эстуарных системах Оби и Енисея // Тр. ВНИРО. 2017. Т. 156. С. 139–150.
- Романов А.Н., Хвостов И.В., Уланов П.Н., Ковалевская Н.М., Кириллов В.В., Плуталова Т.Г., Кобелев В.О., Печкин А.С., Сеницкий А.И., Сысоева Т.Г., Хворова Л.А.* Космический мониторинг арктических и субарктических территорий Ямало-Ненецкого автономного округа. Барнаул: ООО “Пять плюс”, 2018. 120 с.
- Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е.А.* Оценка гидрологических изменений водно-болотных угодий российской Арктики, Субарктики и северной тайги по данным микроволнового дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 4. С. 12–24. DOI: 10.31857/S020596142204008X.
- Романов А.Н., Хвостов И.В., Рябинин И.В., Тихонов В.В., Шадуйко О.М.* Связь сезонных вариаций радиояркостных температур акватории Карского моря с гидролого-климатическими изменениями в Арктике // Изв. вузов. Физика. 2023. № 4. С. 34–47. DOI: 10.17223/00213411/66/4/4.
- Снег: справ. / под ред. Грей Д.М., Мэйл Д.Х. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 752 с.
- Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю., Сеницкий А.И.* Особенности собственного излучения Обской губы в L-диапазоне в период ледостава // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 3. С. 59–76. <https://doi.org/10.31857/S0205961420030070>.
- Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Алексеева Т.А., Сеницкий А.И., Тихонова М.В., Шарков Е.А., Комарова Н.Ю.* Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 185–199. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199.
- Тихонов В.В., Хвостов И.В., Алексеева Т.А., Романов А.Н., Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю.* Анализ гидрологического режима устьевых областей Енисея, Печоры и Хатанги в зимний период по данным спутника SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 6. С. 47–62. DOI: 10.31857/S0205961422060124.
- Шарков Е.А.* Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
- Crabeck O., Galley R., Delille B., Else B., Geilfus N.-X., Lemes M., Roches M.D., Francus P., Tison J.-L., Rysgaard S.* Imaging air volume fraction in sea ice using non-destructive X-ray tomography // The Cryosphere. 2016. V. 10. No. 3. P. 1125–1145. DOI: 10.5194/tc-10-1125-2016.
- Demir O., Johnson J.T., Jezek K.C., Andrews M.J., Ayotte K., Spreen G., Hendricks S., Kaleschke L., Oggier M., Granskog M.A., Fong A., Hoppmann M., Matero I., Scholz D.* Measurements of 540–1740 MHz Brightness Temperatures of Sea Ice During the Winter of the MOSAiC Campaign // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2022. V. 60. Article 5302011. 11 p. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3105360.
- Emery W., Camps A.* Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Application. Amsterdam, Netherlands; Cambridge, MA: Elsevier Inc. 2017. 856 p.
- Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers / eds. Singh V.P., Singh P., Haritashya U.K. Dordrecht: Springer, 2011. 1253 p.
- Frantz C.M., Light B., Farley S.M., Carpenter S., Lieblappen R., Courville Z., Orellana M.V., Junge K.* Physical and optical characteristics of heavily melted “rotten” Arctic sea ice // The Cryosphere. 2019. V. 13. No. 3. P. 775–793. DOI: 10.5194/tc-13-775-2019.
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P., Lopes G., Barbosa J.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. DEIMOS Engenharia. Lisboa, Portugal. 2017. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SMOS-L1c-Data-Processing-Models.pdf>.
- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // Proc. IEEE. 2010. V. 98. No. 5. P. 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
- Lepparanta M.* Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023. 361 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-25605-9>.

- Matzler C. Passive Microwave Signatures of Landscapes in Winter // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 1994. V. 54. P. 241–260. <https://doi.org/10.1007/BF01030063>.
- McMullan K.D., Brown M.A., Martín-Neira M., Rits W., Ekholm S., Marti J., Lemanczyk J. SMOS: The payload // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 3. P. 594–605. DOI: 10.1109/TGRS.2007.914809.
- Oliva R., Martín-Neira M., Corbella I., Closa J., Zurita A., Cabot F., Khazaal A., Richaume P., Kainulainen J., Barbosa J., Lopes G., Tenerelli J., Díez-García R., González-Gambau V., Crapolicchi R. SMOS Third Mission Reprocessing after 10 Years in Orbit // *Remote Sensing*. 2020. V. 10. No. 12. P. 1645. 24 p. <https://doi.org/10.3390/rs12101645>.
- Petrich C., Eicken H. Growth, Structure and Properties of Sea Ice // *Sea Ice* / eds. Thomas D.N., Dieckmann G.S. Chichester: Blackwell Publishing Ltd, 2010. P. 23–77.
- Ran Y., Li X., Cheng G., Che J., Juha A., Olli K., Jan H., Miska L., Jin H., Jaroslav O., Masahiro H., Yu Q., Chang X. New high-resolution estimates of the permafrost thermal state and hydrothermal conditions over the Northern Hemisphere // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. P. 865–884. <https://doi.org/10.5194/essd-14-865-2022>.
- Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic Discrete Global Grid System // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. No. 2. P. 121–134. DOI: 10.1559/152304003100011090.
- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E. Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. No. 8. P. 2727–2740. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018>.
- Tikhonov V.V., Romanov A.N., Khvostov I.V., Alekseeva T.A., Sinitskiy A.I., Tikhonova M.V., Sharkov E.A., Komarova N.Yu. Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // *Российская Арктика (Russian Arctic)*. 2022. No. 2(17). P. 44–71. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71.
- Timco G.W., Frederking R.M.W. A review of sea ice density // *Cold Regions Science and Technology*. 1996. V. 24. No. 1. P. 1–6. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(95\)00007-X](https://doi.org/10.1016/0165-232X(95)00007-X).
- Ulaby F.T., Long D.G. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing. Ann Arbor, Michigan: Univ. of Michigan Press, 2014. 984 p.
- Zwally H.J., Comiso J.C., Parkinson C.L., Campbell W.J., Carsey F.D., Gloersen P. Antarctic Sea Ice 1973–1976 from Satellite Passive-Microwave Observations. NASA Spec. Publ. Ser. 459. 1983. 206 p.

## A Model of Microwave Emission from Mouth Regions of Arctic Rivers Providing for Radiometer Pixel Land Contamination

V. V. Tikhonov<sup>1,2,3</sup>, I. V. Khvostov<sup>2</sup>, A. N. Romanov<sup>2</sup>, E. A. Sharkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute for Water and Environmental Problems of the SB RAS, Barnaul, Russia

<sup>3</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

The paper presents a model of microwave emission from mouth regions of Arctic rivers taking into account radiometer pixel contamination by land. Modeling of seasonal and interannual dynamics of brightness temperature of different regions of the Yenisei Bay is performed on the example of MIRAS radiometer data from the SMOS satellite. The necessity of considering the coastal zone in brightness temperature modeling in the studied regions is shown. Comparison of the model calculations with SMOS LIC data has shown a good agreement. Analysis of model calculations and satellite data has allowed us to determine the location of the fresh and salt water mixing zone in the Yenisei Bay during the ice period, provided that the model takes into account the coastal zone captured by the radiometer pixel.

*Keywords:* SMOS, brightness temperature, estuary, ice cover, coastal area, model of microwave emission

### REFERENCES

- Boyarskii D.A., Romanov A.N., Khvostov I.V., Tikhonov V.V., Sharkov E.A. Otsenka glubiny promerzaniya pochvennogo pokrova po dannym sputnika SMOS [On Evaluating the Depth of Soil Freezing Based on SMOS Satellite Data] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. No. 9. P. 996–1004. <https://doi.org/10.1134/S0001433819090147>.
- Bryzgalo V.A., Nikanorov A.M., Kosmenko L.S., Reshetniak O.S. Ust'evye ekosistemy krupnykh rek Rossii: antropogennaia nagruzka i ekologicheskoe sostoianie [Estuary ecosystems of Russia's major rivers: anthropogenic pressure and ecological status]. Rostov on the Don: SFedU, 2015. 164 p. (In Russian).
- Geograficheskii entsiklopedicheskii slovar'. Geograficheskie nazvaniia [Geographical Encyclopedic Dictionary. Geographical names] / ed. Treshnikov A. F. M.: Soviet Encyclopedia, 1989. 592 p. (In Russian).
- Dolgoplova E.N. Rol' mnogoletnemerzlykh porod v formirovaniy gidrologo-morfologicheskogo rezhima ust'ev rek vodosbora Severnogo Ledovitogo okeana [The role of permafrost in the formation of the hydrological and morphological regime of river mouths in the Arctic Ocean watershed area] // *Arctic: ecology and economy*. 2018. V. 32. No. 4. P. 55–70. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-70-85. (In Russian).
- Konik A.A., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Pedchenko A.P. Otsenka izmenchivosti kharakteristik Stokovoi frontal'noi



- zony Karskogo moria na osnove kompleksirovaniia dannykh sputnikovogo distantsionnogo zondirovaniia [Assessment of the variability of the River Plums frontal zone in the Kara Sea on the basis of integration of satellite remote sensing data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. V. 18. No. 2. P. 241–250. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250. (In Russian).
- Lapin S.A.* Osobennosti formirovaniia presnovodnogo stoka v estuariykh sistemakh Obi i Eniseia [Features of freshwater flow formation in estuary systems of the Ob and the Yenisei] // *Trudy VNIRO*. 2017. V. 156. P. 139–150. (In Russian).
- Romanov A.N., Khvostov I.V., Ulanov P.N., Kovalevskaja N.M., Kirillov V.V., Plutalova T.G., Kobelev V.O., Pechkin A.S., Sinickij A.I., Syssoeva T.G., Hvorova L.A.* Kosmicheskij monitoring arkticheskikh i subarkticheskikh territorij Jamalo-Nenckogo avtonomnogo okruga [Space monitoring of Arctic and subarctic territories of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug]. Barnaul: Five Plus LLC, 2018. 120 p. (In Russian).
- Romanov A.N., Khvostov I.V., Tikhonov V.V., Sharkov E.A.* Assessing Hydrological Changes in Wetland Areas of the Russian Arctic, Subarctic, and Northern Taiga Based on Microwave Remote Sensing Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. V. 58. No. 9. P. 1100–1110. DOI: 10.1134/S0001433822090201.
- Romanov A.N., Khvostov I.V., Ryabinin I.V., Tikhonov V.V., Shaduyko O.M.* Svjaz' sezonnykh variacij radiojarkostnykh temperatur akvatorii Karskogo morja s gidrologo-klimaticheskimi izmenenijami v Arktike [Relationship between seasonal variations in radio-brightness temperatures in the Kara Sea area and hydrological-climate changes in the Arctic] // *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2023. № 4. P. 34–47. DOI: 10.17223/00213411/66/4/4.
- Sneg: spravochnik [Handbook of Snow]* / ed. Gray D.M., Male D.H. New Jersey: The Blackburn Press. 1981. 776 p.
- Tikhonov V.V., Khvostov I.V., Romanov A.N., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu., Sinitskiy A.I.* Features of the Intrinsic L-Band Radiation of the Gulf of Ob during the Freeze-Up Period // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. No. 9. P. 936–949. <https://doi.org/10.1134/S0001433820090236>.
- Tikhonov V.V., Khvostov I.V., Romanov A.N., Alekseeva T.A., Sinitskiy A.I., Tikhonova M.V., Sharkov E.A., Komarova N.Yu.* Mezhdogodovye variatsii sobstvennogo mikrovolnovogo izlucheniia Obskoi guby v period ledostava i ikh svjaz' s gidrologicheskimi i klimaticheskimi izmenenijami regiona [Interannual variation of microwave radiation of the Gulf of Ob during the freezing season and relationship to hydrological and climate changes in the region] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. V. 18. No. 6. P. 185–199. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199. (In Russian).
- Tikhonov V.V., Khvostov I.V., Alekseeva T.A., Romanov A.N., Afanasyeva E.V., Sokolova J.V., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu.* Analysis of the Winter Hydrological Regime of the Yenisei, Pechora, and Khatanga Estuaries Using SMOS Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. V. 58. No. 12. P. 1519–1531. DOI: 10.1134/S0001433822120234.
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
- Crabeck O., Galley R., Delille B., Else B., Geilfus N.-X., Lemes M., Roches M.D., Francus P., Tison J.-L., Rysgaard S.* Imaging air volume fraction in sea ice using non-destructive X-ray tomography // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. No. 3. P. 1125–1145. DOI: 10.5194/tc-10-1125-2016.
- Demir O., Johnson J.T., Jezek K.C., Andrews M.J., Ayotte K., Spreen G., Hendricks S., Kaleschke L., Oggier M., Granskog M.A., Fong A., Hoppmann M., Matero I., Scholz D.* Measurements of 540–1740 MHz Brightness Temperatures of Sea Ice During the Winter of the MOSAiC Campaign // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. V. 60. Article 5302011. 11 p. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3105360.
- Emery W., Camps A.* Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Application. Amsterdam, Netherlands; Cambridge, MA: Elsevier Inc. 2017. 856 p.
- Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* / eds. Singh V.P., Singh P., Haritashya U.K. Dordrecht: Springer, 2011. 1253 p.
- Frantz C.M., Light B., Farley S.M., Carpenter S., Lieblappen R., Courville Z., Orellana M.V., Junge K.* Physical and optical characteristics of heavily melted “rotten” Arctic sea ice // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. No. 3. P. 775–793. DOI: 10.5194/tc-13-775-2019.
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P., Lopes G., Barbosa J.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. DEIMOS Engenharia. Lisboa, Portugal. 2017. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SMOS-L1c-Data-Processing-Models.pdf>.
- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proc. IEEE*. 2010. V. 98. No. 5. P. 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
- Lepparanta M.* Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023. 361 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-25605-9>.
- Matzler C.* Passive Microwave Signatures of Landscapes in Winter // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 1994. V. 54. P. 241–260. <https://doi.org/10.1007/BF01030063>.
- McMullan K.D., Brown M.A., Martín-Neira M., Rits W., Ekholm S., Marti J., Lemanczyk J.* SMOS: The payload // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 3. P. 594–605. DOI: 10.1109/TGRS.2007.914809.
- Oliva R., Martín-Neira M., Corbella I., Closa J., Zurita A., Cabot F., Khaazaal A., Richaume P., Kainulainen J., Barbosa J., Lopes G., Tenerelli J., Díez-García R., González-Gambau V., Crapolicchi R.* SMOS Third Mission Reprocessing after 10 Years in Orbit // *Remote Sensing*. 2020. V. 10. № 12. P. 1645. 24 p. <https://doi.org/10.3390/rs12101645>.
- Petrich C., Eicken H.* Growth, Structure and Properties of Sea Ice // *Sea Ice* / eds. Thomas D.N., Dieckmann G.S. Chichester: Blackwell Publishing Ltd, 2010. P. 23–77.
- Ran Y., Li X., Cheng G., Che J., Juha A., Olli K., Jan H., Miska L., Jin H., Jaroslav O., Masahiro H., Yu Q., Chang X.* New high-resolution estimates of the permafrost thermal state and hydrothermal conditions over the Northern Hemisphere // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. P. 865–884. <https://doi.org/10.5194/essd-14-865-2022>.
- Sahr K., White D., Kimerling A.J.* Geodesic Discrete Global Grid System // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. No. 2. P. 121–134. DOI: 10.1559/152304003100011090.

- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E.* Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. No. 8. P. 2727–2740. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018>.
- Tikhonov V.V., Romanov A.N., Khvostov I.V., Alekseeva T.A., Sinitskiy A.I., Tikhonova M.V., Sharkov E.A., Komarova N.Yu.* Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // *Rossiiskaya Arktika [Russian Arctic]*. 2022. No. 2(17). P. 44–71. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71.
- Timco G.W., Frederking R.M.W.* A review of sea ice density // *Cold Regions Science and Technology*. 1996. V. 24. No. 1. P. 1–6. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(95\)00007-X](https://doi.org/10.1016/0165-232X(95)00007-X).
- Ulaby F.T., Long D.G.* *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. Ann Arbor, Michigan: Univ. of Michigan Press, 2014. 984 p.
- Zwally H.J., Comiso J.C., Parkinson C.L., Campbell W.J., Carsey F.D., Gloersen P.* *Antarctic Sea Ice 1973-1976 from Satellite Passive-Microwave Observations*. NASA Spec. Publ. Ser. 459. 1983. 206 p.