

**Илья А. Косолапов**  
**Даниил С. Волков**  
**Дмитрий А. Гребенников**  
**Андрей В. Сахно**  
**Сергей А. Лебедев**



*Институт океанологии  
им. П.П. Ширшова РАН*



*Московский физико-  
технический институт*



*Сколковский институт  
науки и технологий*



*Научно-технический  
университет «Сириус»*



*Национальный исследовательский  
университет «МИЭТ»*



*Геофизический Центр РАН*



*Майкопский государственный  
технологический университет*

# **АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НАД КАСПИЙСКИМ МОРЕМ ПО ДАННЫМ СВЧ-РАДИОМЕТРИИ**

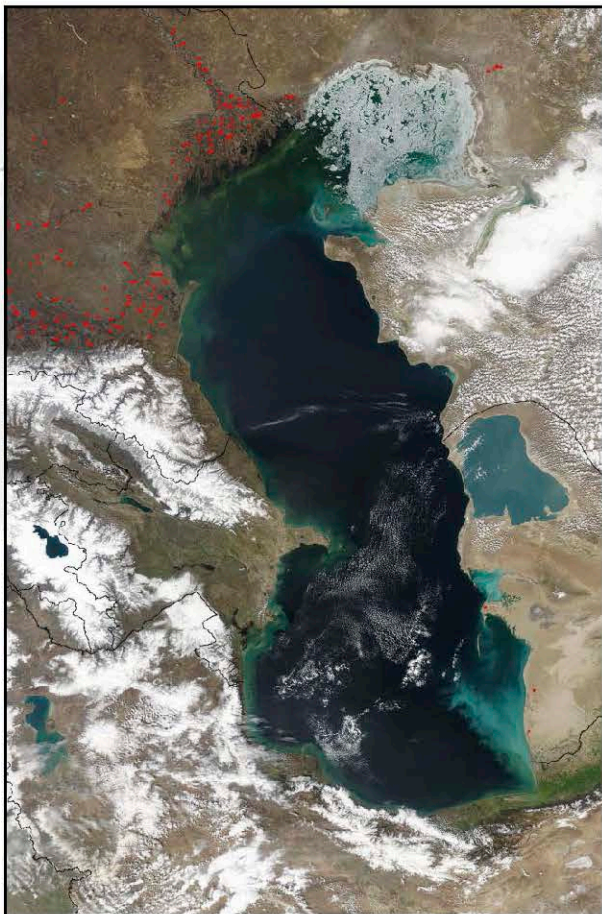


Двадцать первая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»  
13–17 ноября 2023, Москва, Институт космических исследований РАН

© 2023, И.А. Косолапов, Д.С. Волков, Д.А. Гребеников, А.В. Сахно, С.А. Лебедев



# Аннотация

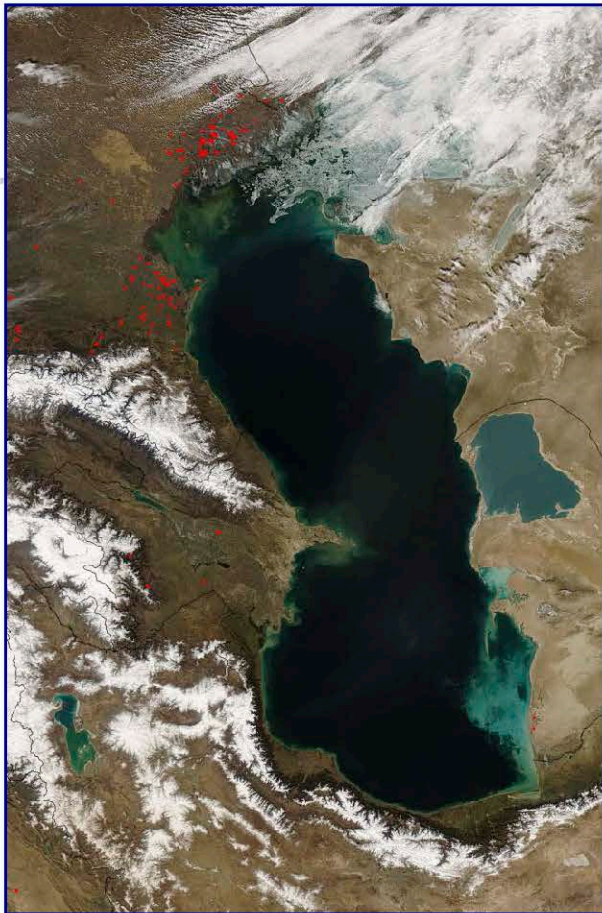


Для исследования климатических изменений параметров атмосферы над акваторией Каспийского моря обычно пользуются данные атмосферных реанализов или метеостанций. Однако данные дистанционного зондирования в СВЧ диапазоне позволяют исследовать такие важные параметры как скорость приводного ветра, интегральное содержания водяного пара и содержание водяного пара в облаках непосредственно над акваторией моря.

Применение СВЧ–радиометрии для климатических исследований стало возможным после запуска в 1978 г. многоканального сканирующего радиометра SMMR. С 1987 г. постоянно функционируют оперативные метеорологические спутники DMSP с СВЧ–радиометрами SSM/I, SSM/T–1 и SSM/T–2. Таким образом, в настоящее время появилась уникальная возможность оценивать изменения климатически значимых параметров методами спутниковой СВЧ-радиометрии.



# Аннотация



Традиционно, аномальные явления выделяются по распределениям параметров, соответствующим климатической норме, в качестве отклонений превышающих три сигмы или определенный процентиль от плотности вероятности (например 10%, 5%, или 1% для экстремальных отрицательных аномалий и соответственно, 90%, 95%, 99% – для положительных аномалий). Однако отклонения годовой плотности распределения от климатической нормы, могут наблюдаться не только на «хвостах» распределений, но и в смещении средних величин и т.д.

В работе представлены результаты анализа климатической изменчивости годовых распределений скорости приводного ветра, интегрального содержания водяного пара и содержания водяного пара в облаках, полученных по данным СВЧ-радиометрии для региона Каспийского моря за 1987–2022 годы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования» (2023-2026), <https://rscf.ru/project/23-77-00027>

# СВЧ-радиометрия

Микроволновые радиометры необходимы для определения интегральных параметров атмосферы по радиотепловому излучению: влагозапаса атмосферы или интегрального содержания водяного пара

$$Q = \int_0^{\infty} \rho(z) \cdot dz,$$

где  $\rho(z)$  – вертикальный профиль абсолютной влажности, и водозапаса облаков

$$W = \int_{z_1}^{z_2} w(z) \cdot dz,$$

где  $w(z)$  – вертикальный профиль водности,  $z_1, z_2$  – высоты верхней и нижней границ облака.

Наиболее информативные участки спектра излучения атмосферы для решения этих задач следующие: 1,6–1,9 мм, 4,2–3,0 мм, 7–9,5 мм, 12,8–14,3 мм, 20–32 мм. При наличии слоистообразных облаков определение влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков осуществляется по измерениям характеристик радиотеплового излучения на двух частотах вблизи центра линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц и диапазоне 35,0–37,0 ГГц. При наличии мощных конвективных облаков определение водозапаса облаков осуществляется по измерениям характеристик радиотеплового излучения атмосферы при зондировании на частотах 9,3 ГГц и 36,5 ГГц.



# Спутниковая СВЧ-радиометрия

Satellite*	Microwave Imagery Sensor	Sensor Frequencies (GHz)	Temporal Coverage	Ascending Equator Crossing Time (Local Time)	Descending Equator Crossing Time (Local Time)	Approximate Swath Width for Microwave Imagery	Launch Date
DMSP-F18	SSMIS	19, 22, 37, 91	2010/01/29 - present	18:03	07:08	1700 km	2009/10/18
DMSP-F17			2006/11/04 - present	18:33	06:20	1700 km	2006/11/04
DMSP-F16			2005/11/04 - present	15:52	03:52	1700 km	2003/10/18
DMSP-F15			2000/01/24 - present	14:50	02:47	1500 km	1999/12/12
DMSP-F13	SSM/I	19, 22, 37, 85	1995/05/03 - 2008/12/31	17:43	05:51	1400 km	1995/03/24
DMSP-F11			1991/12/03 - 1995/09/30	18:25	05:00	1400 km	1991/11/28
DMSP-F10			1992/03/09 - 1997/11/04	22:08**	07:30**	1400 km	1990/12/01
DMSP-F08			1987/09/07 - 1991/12/30	06:17	06:10	1400 km	1987/06/18
Nimbus-7	SMMR	6, 10, 18, 21, 37	1978/10/25 - 1987/08/20	12:00	12:00	783 km	1978/10/24

\*All satellites are in a near-circular, sun-synchronous, polar orbit.

\*\*Due to the DMSP-F10 satellite not achieving its desired orbit, the equator crossing time increased by approximately 45 minutes per year; as of 1995/09/02, the local equator crossing times were 22:08 (ascending) and 07:30 (descending).



# Модель переноса микроволнового излучения в системе океан-атмосфера

Перенос микроволнового излучения в системе океан – атмосфера сопровождается излучением, поглощением и рассеянием атмосферными газами, облаками, осадками и поверхностью океана. Это взаимодействие излучения со средой описывается радиационно-метеорологической моделью, элементы которой должны адекватно отражать реальные связи характеристик поля излучения с геофизическими параметрами. Адекватность задания такой модели чрезвычайно важна при разработке методов оценки различных параметров системы, основанных на физическом подходе, поскольку ее погрешности оказывают влияние на точность определения параметров при решении обратных задач.

В отсутствии осадков длина волны излучения  $\lambda \gg r$  – характерного размера частиц, взаимодействующих с излучением. Для рабочих частот микроволнового радиометра (от 6.9 до 89 ГГц) такое предположение справедливо для атмосферных газов всегда, а для облаков – практически всегда, поскольку радиусы облачных капель редко превосходят 50–80 мкм. При таком предположении атмосфера не рассеивает, а только излучает и поглощает микроволновую радиацию.



# Модель переноса микроволнового излучения в системе океан-атмосфера

Общая дифференциальная форма уравнения переноса радиояркой температуры микроволнового излучения  $T_B$  вдоль направления  $s$  под азимутальным ( $\varphi$ ) и зенитным ( $\theta$ ) углами в атмосфере без рассеяния с коэффициентом поглощения  $\alpha_n$  имеет следующий вид:

$$dT_B(\varphi, \theta) = \alpha_n [T - T_B(\varphi, \theta)] ds,$$

где  $T$  – температура атмосферы.

В большинстве случаев (исключая большие углы визирования, когда необходимо учитывать явления рефракции) при решении уравнения переноса достаточно рассматривать атмосферу как плоскострую среду, заменяя пространственную координату  $s$  вдоль направления излучения на вертикальную координату  $h$ :

$ds = dh/\mu$ , где  $\mu = \cos \theta$ . Упрощенная форма одномерного уравнения переноса излучения в приближении «чистого поглощения» принимает вид:

$$\mu \frac{dT_B(h)}{dh} = -\alpha_n(h) T_B(h) + \alpha_n(h) T(h).$$

# Модель переноса микроволнового излучения в системе океан-атмосфера

В таком одномерном приближении, учитывая граничные условия на верхней границе атмосферы и на поверхности океана, суммарное восходящее излучение системы будет включать в себя четыре составляющие: восходящее излучение атмосферы  $T_{Ba}^{up}$ , нисходящее излучение атмосферы, отражённое поверхностью океана и ослабленное слоем атмосферы  $T_{Ba}^{dn}$ , излучение океана, ослабленное в атмосфере  $T_{Bo}$  и космическое излучение  $T_c$ :

$$T_B = T_{Ba}^{up} + T_{Ba}^{dn} + T_{Bo} + T_c,$$

$$T_{Ba}^{up} = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{\infty} T(h) \alpha_n(h) \exp(\tau) dh, \quad T_{Ba}^{dn} = (1 - \chi) \exp(-\tau) \frac{1}{\mu_0} \int_0^{\infty} T(h) \alpha_n(h) \exp(-\tau) dh,$$

$$T_{Bo} = \chi T_S \exp(-\tau), \quad T_c = 2,7 \cdot \exp(-2\tau) (1 - \chi)$$

где  $\tau = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{\infty} \alpha_n(h') dh'$  – оптическая толщина атмосферы,  $\chi$  – коэффициент излучательной способности поверхности океана,  $T_S$  – температура поверхности океана. Для расчета радиояркой температуры  $T_B$  уходящего микроволнового излучения в системе атмосфера-океан в рамках сделанных приближений (отсутствие осадков и рефракции) требуется информация о поглощении микроволнового излучения в атмосферных газах и облаках –  $\alpha_n(h)$



# Модель переноса микроволнового излучения в системе океан-атмосфера

Как при проведении численных расчетов радиоярких температур  $T_B$ , так и при построении аналитических функций, аппроксимирующих  $T_B$ , необходимыми элементами расчета являются модели атмосферы, включающие в себя высотные профили метеопараметров, и модели облачности, содержащие сведения о ее толщине, границах, распределении влажности по высоте:

- модель распределения метеопараметров по высоте на основе данных радиозондирования;
- модель облачности – вертикальные профили влажности  $w(h)$ , сконструированные с учетом вертикальных профилей влажности атмосферы, измеренных радиозондами, судовых наблюдений форм и количества облаков и статистических данных о вариациях их влажности (Митник, 1980);
- модель Liebe93 поглощения микроволнового излучения кислородом представленная в работе (Liebe et al., 1993);
- модель Liebe93 поглощения микроволнового излучения водяным паром для всех частот, кроме диапазона 20–24 ГГц, представленная в работе (Liebe et al., 1993)
- модель поглощения микроволнового излучения водяным паром для частот диапазона 20–24 ГГц, представленная в работе (Cruz Pol, Ruf, 1999);
- модель зависимости коэффициента излучения океана от скорости приводного ветра, построенная на данных SSM/I (Rosenkrantz, 1992);
- модель диэлектрической проницаемости воды (Elisson et al., 1998);
- модель реликтового космического излучения (Stogryn, 1975).

Двадцать первая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»  
13-17 ноября 2023, Москва, Институт космических исследований РАН



# Расчет скорости приводного ветра по данным микроволнового радиометра

В формализованном виде алгоритм расчета скорости приводного ветра ( $W_S$ ) по данным измерений на многоканального микроволнового радиометра можно записать в виде:

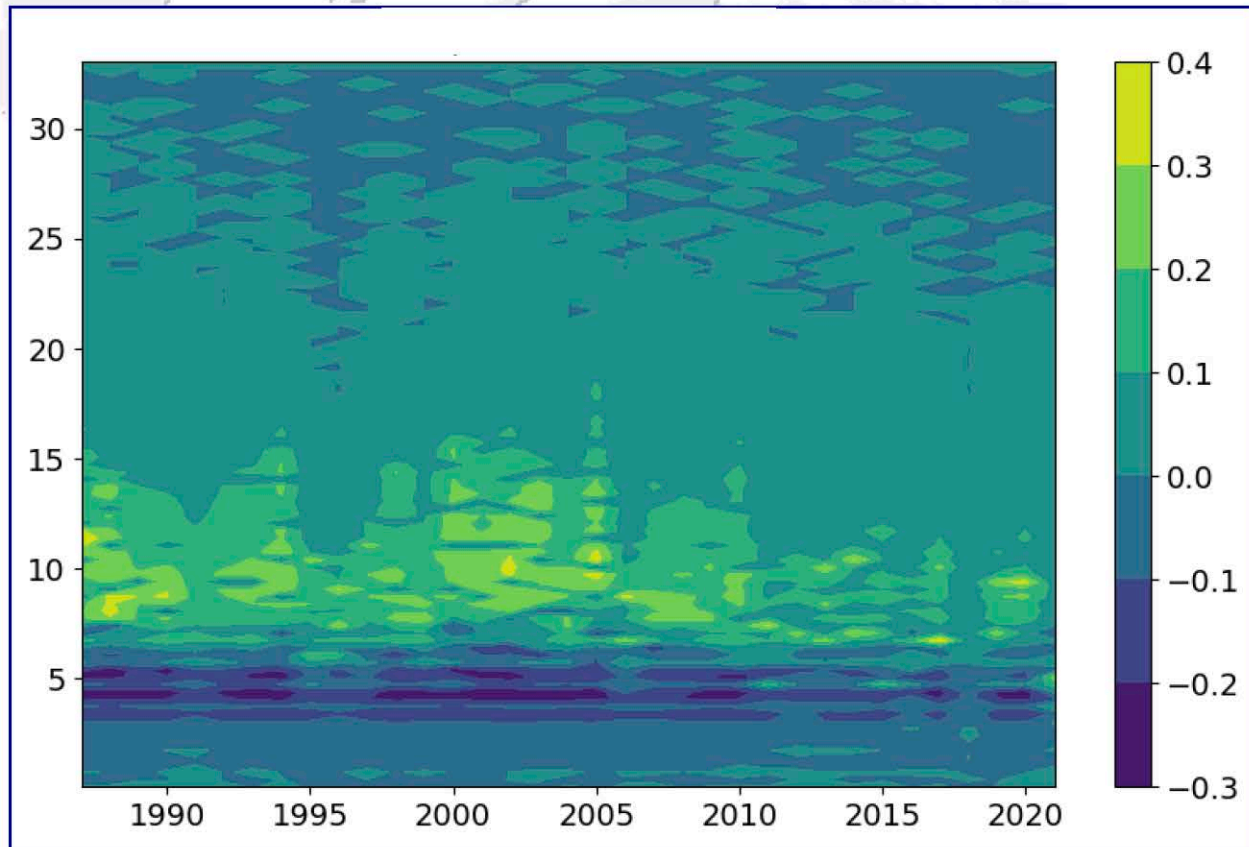
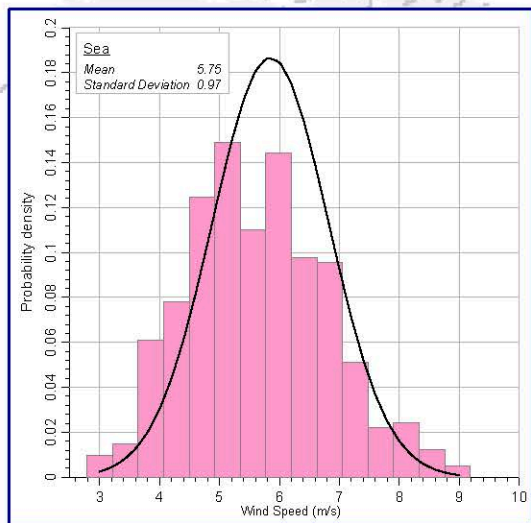
$$W_S = a_0 + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N (b_{ij} \cdot t_{ij}) + d_0 \cdot \sec \theta,$$

где  $j$  – индекс поляризации канала ( $j = 1$  – вертикальная поляризация,  $j = 2$  – горизонтальная поляризация);  $i$  – номер каналов радиометра;  $N$  – общее число каналов. Для рабочих частот 6,6 ГГц и 10,7 ГГц независимо от поляризации  $t_{ij} = T_{Bij}$  – радиояркостьная температура по  $i$ -му каналу с учетом индекса поляризации  $j$ , а для каналов 18,0 ГГц и 21,0 ГГц:  $t_{ij} = \ln( T_{Aij} - T_{Bij} )$ , где  $T_{Aij}$  – радиояркостьная эталонная температура атмосферы по  $i$ -му каналу с учетом индекса поляризации  $j$ ;  $a_0$ ,  $b_{ij}$  и  $d_0$  – коэффициенты, зависящие от частоты канала и его поляризации, а также от типа микроволнового радиометра;  $\theta$  – угол сканирования.

# Расчет скорости приводного ветра по данным микроволнового радиометра

Значения коэффициентов	Радиометр SMMR					
	Рабочая частота, ГГц					
	18,0 V	18,0 Н	21,0 V	21,0 Н	37,0 V	37,0 V
	Скорость приводного ветра < 7 м/с					
	$T_{Aij} = 280,0$		$a_0 = -523,9$		$d_0 = 2,999$	
$b_{ij}$	0,2229	0,6056	130,3	-39,19	10,24	-35,75
	Скорость приводного ветра > 7 м/с					
	$T_{Aij} = 280,0$		$a_0 = -465,3$		$d_0 = 2,357$	
$b_{ij}$	0,6216	0,2873	168,7	-86,31	15,84	-37,17

# Распределение скорости приводного ветра над акваторией Каспийского моря



**Плотность вероятности  
среднемесячных  
скоростей ветра  
над акваторией  
Каспийского моря  
по данным**

**СВЧ–радиометрии за временной интервал 1980–2022 гг. Сплошной линией  
показаны соответствующие распределения Гаусса. На каждом рисунке указано  
среднее значения и величина стандартного отклонения.**

# Расчет интегрального содержания водяного пара в атмосфере и влагозапаса облаков по данным микроволнового радиометра

Основной вклад в микроволновое излучение водяного пара вносят две резонансные линии на частоте 22,235 ГГц и 183,31 ГГц. При этом наибольший интерес для определения влагозапаса представляет линия 22,235 ГГц, так как измерения на этой частоте позволяют получать информацию о содержании водяного пара во всей толще атмосферы и в облаках.

При зондировании атмосферы в микроволновом диапазоне на частотах 3–15 ГГц радиометр определяет излучательную способность поверхности с небольшой коррекцией на пары воды. В диапазоне 15–35 ГГц влияние испарений воды увеличивается, а на частотах выше 35 ГГц эффект поглощения молекулами водяного пара атмосферы становится доминирующим.

В современных микроволновых радиометрах частота 19,35 ГГц используется для дистанционной индикации осадков; частота 22,24 ГГц (или 22,24 и 37,00 ГГц) – для определения суммарной концентрации паров воды в атмосфере; частота 37,00 ГГц – для измерения количества выпадающего дождя и содержания воды в облаках (и для определения льда на поверхности океана); частота 85,50 ГГц используется для определения температуры атмосферы и ее общего водозапаса.



# Расчет интегрального содержания водяного пара в атмосфере и влагозапаса облаков по данным микроволнового радиометра

Простейший линейный регрессионный алгоритм расчета  $Q$  и  $W$  по данным измерений многоканального микроволнового радиометра спутников можно записать в виде:

$$Q \text{ или } W = a_0 + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N \left( b_{ij} \cdot \ln \left( T_{A_{ij}} - T_{B_{ij}} \right) \right) + d_0 \cdot \theta$$

где  $j$  – индекс поляризации канала ( $j = 1$  – вертикальная поляризация,  $j = 2$  – горизонтальная поляризация);  $i$  – номер каналов радиометра;  $N$  – общее число каналов;  $T_{B_{ij}}$  – радиояркость температура по  $i$ -му каналу с учетом индекса поляризации  $j$ ,  $T_{A_{ij}}$  – радиояркость эталонная температура атмосферы по  $i$ -му каналу с учетом индекса поляризации  $j$ ;  $a_0$ ,  $b_{ij}$  и  $d_0$  – коэффициенты, зависящие от частоты канала и его поляризации, а также от типа микроволнового радиометра;  $\theta$  – угол сканирования.

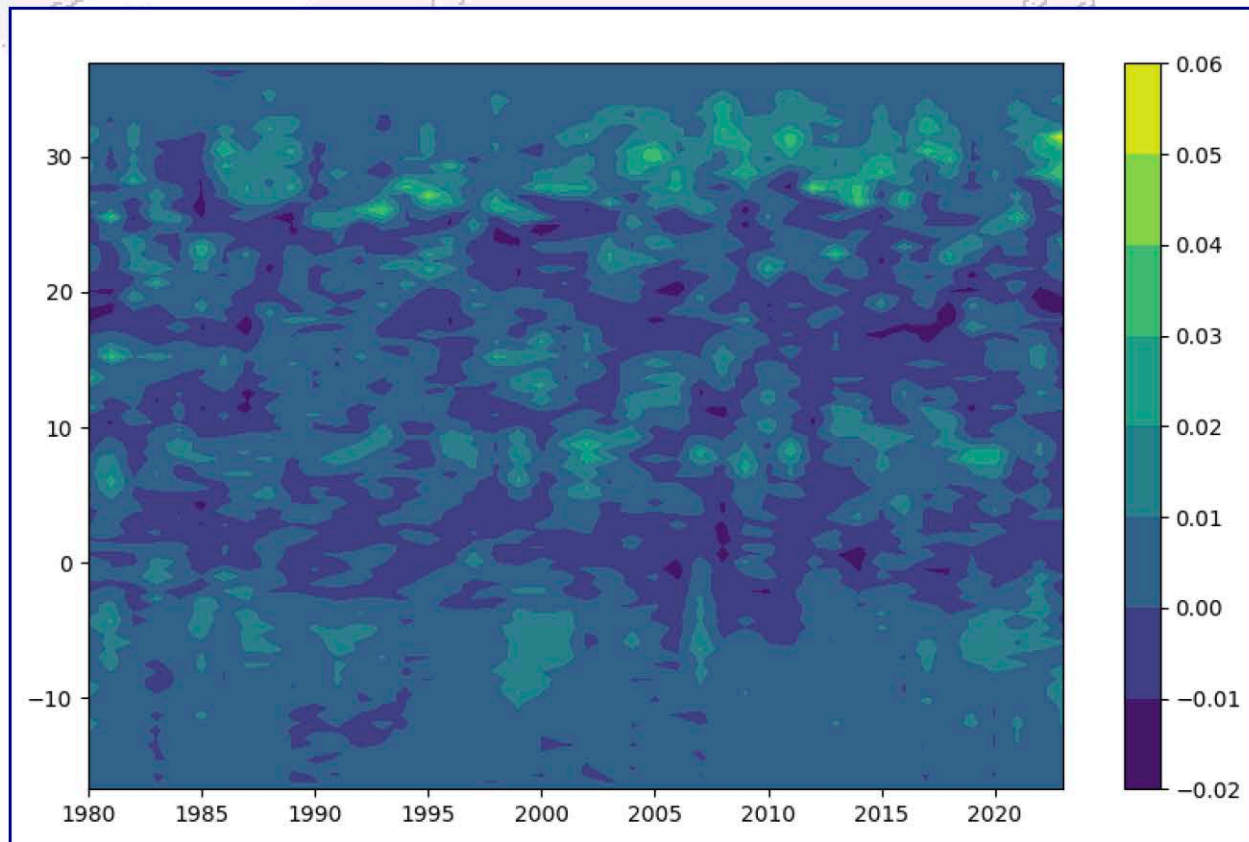
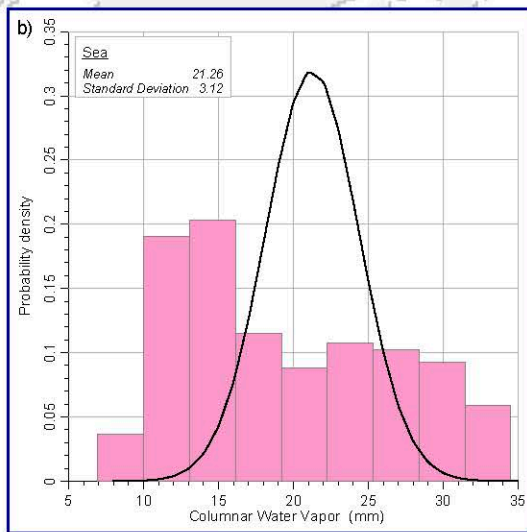
Данный алгоритм расчета влагозапаса атмосферы по данным микроволнового радиометра можно упростить до вида:

$$Q = a_0 + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N \left( b_{ij} \cdot \ln \left( T_{A_{ij}} - T_{B_{ij}} \right) \right)$$

# Расчет интегрального содержания водяного пара по данным микроволнового радиометра

Значения коэффициентов	Радиометр SMMR					
	Рабочая частота, ГГц					
	10,6 V	10,6 H	21.0 V	21.0 H	37,0 V	37,0 V
	$T_{A_{ij}} = 280,0$		$a_0 = -9,784$		$d_0 = 0,039$	
$b_{ij}$	6,927	5,361	-4,518	6,081		
	Радиометр SSM/I					
	Рабочая частота, ГГц					
	19.35 V	19.35 H	22,235 V	22,235 H	37,0 V	37,0 V
	$T_{A_{ij}} = 280,0$		$a_0 = -9,784$		$d_0 = 0,0$	
$b_{ij}$			-39.50		12.49	
	$T_{A_{ij}} = 280,0$		$a_0 = 236.552$		$d_0 = 0,0$	
$b_{ij}$	-14,419	-24,667	-26,995		-8,057	24,339
	$T_{A_{ij}} = 280,0$		$a_0 = 26,8277$		$d_0 = 0,0$	
$b_{ij}$	-1,24809	-5,48472	-3,1953		0,111280	2,09512

# Распределение интегрального содержания водяного пара над акваторией Каспийского моря



**Плотность вероятности среднемесячного интегрального содержания водяного пара над акваторией Каспийского моря по данным СВЧ-радиометрии за временной интервал 1980–2022 гг. Сплошной линией показаны соответствующие распределения Гаусса. На каждом рисунке указано среднее значения и величина стандартного отклонения.**

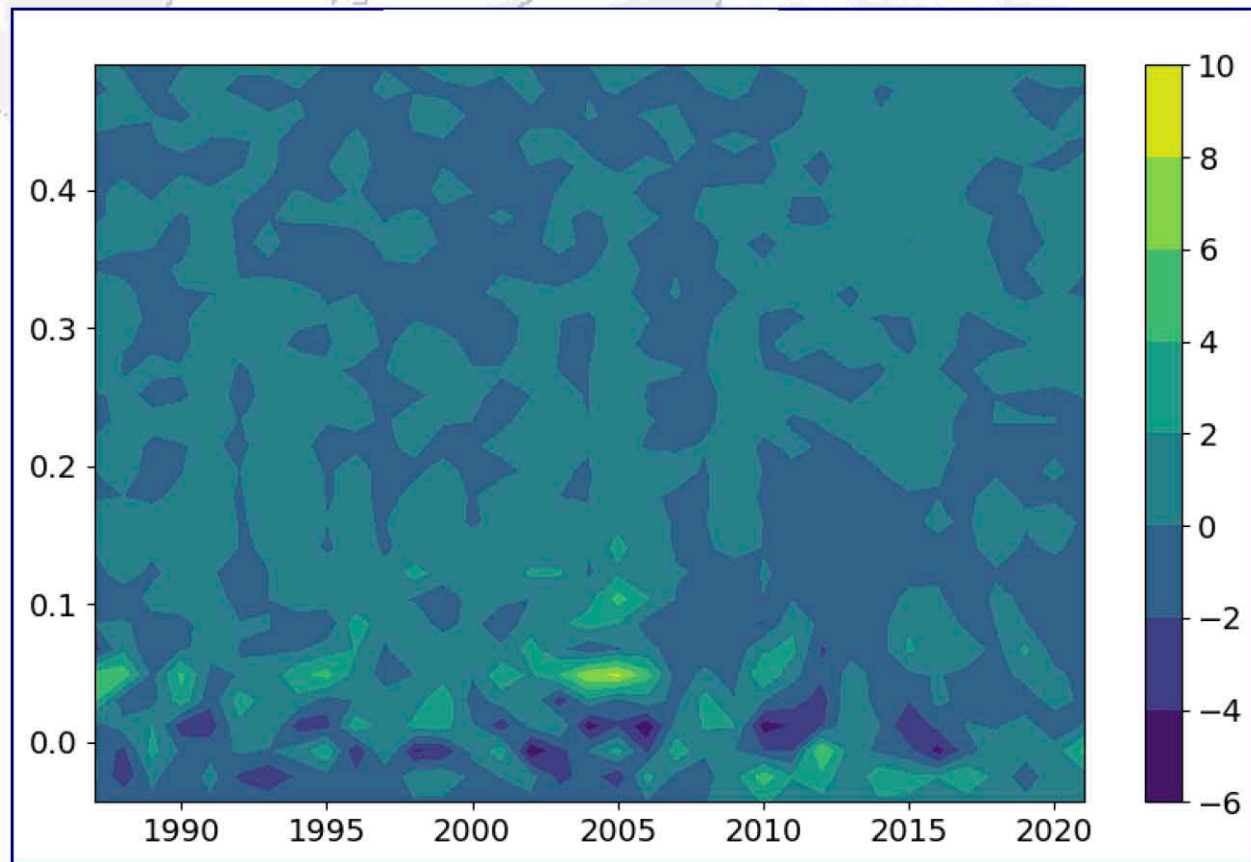
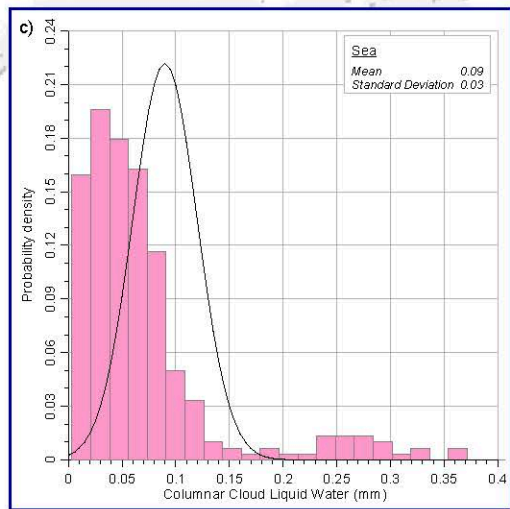
Двадцать первая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» 13-17 ноября 2023, Москва, Институт космических исследований РАН



# Расчет влагосодержания в облаках по данным микроволнового радиометра

Значения коэффициентов	Радиометр SMMR					
	Рабочая частота, ГГц					
	10,6 V	10,6 H	21.0 V	21.0 H	37,0 V	37,0 V
	$T_{A_{ij}} = 280,0$		$a_0 = 246,1$		$d_0 = -3,391$	
$b_{ij}$	-51,72 <sup>ij</sup>	134,4	46,14	24,95	-155,5	-36,63
	Радиометр SSM/I					
	Рабочая частота, ГГц					
	19.35 V	19.35 H	22,235 V	22,235 H	37,0 V	37,0 V
	$T_{A_{ij}} = 280,0$		$a_0 = 0,71082$		$d_0 = 0,0$	
$b_{ij}$		1,74636				1,98
	$T_{A_{ij}} = 280,0$		$a_0 = 4,29930$		$d_0 = 0,0$	
$b_{ij}$			0,399635		1,40692	
	$T_{A_{ij}} = 280,0$		$a_0 = 1,245096$		$d_0 = 0,0$	
$b_{ij}$	-0,066106	1,121951	0,098642		-0,395627	-1,094893

# Распределение влагосодержания в облаках над акваторией Каспийского моря



**Плотность вероятности  
среднемесячного  
влагосодержания в  
облаках над акваторией  
Каспийского моря  
по данным**

**СВЧ–радиометрии за временной интервал 1980–2022 гг. Сплошной линией  
показаны соответствующие распределения Гаусса. На каждом рисунке указано  
среднее значения и величина стандартного отклонения.**

# Заключение

**В работе представлены результаты анализа климатической изменчивости годовых распределений скорости приводного ветра, интегрального содержания водяного пара и содержания водяного пара в облаках, полученных по данным СВЧ-радиометрии для региона Каспийского моря за 1987–2022 годы.**

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования» (2023-2026), <https://rscf.ru/project/23-77-00027>*





**Спасибо за внимание**

