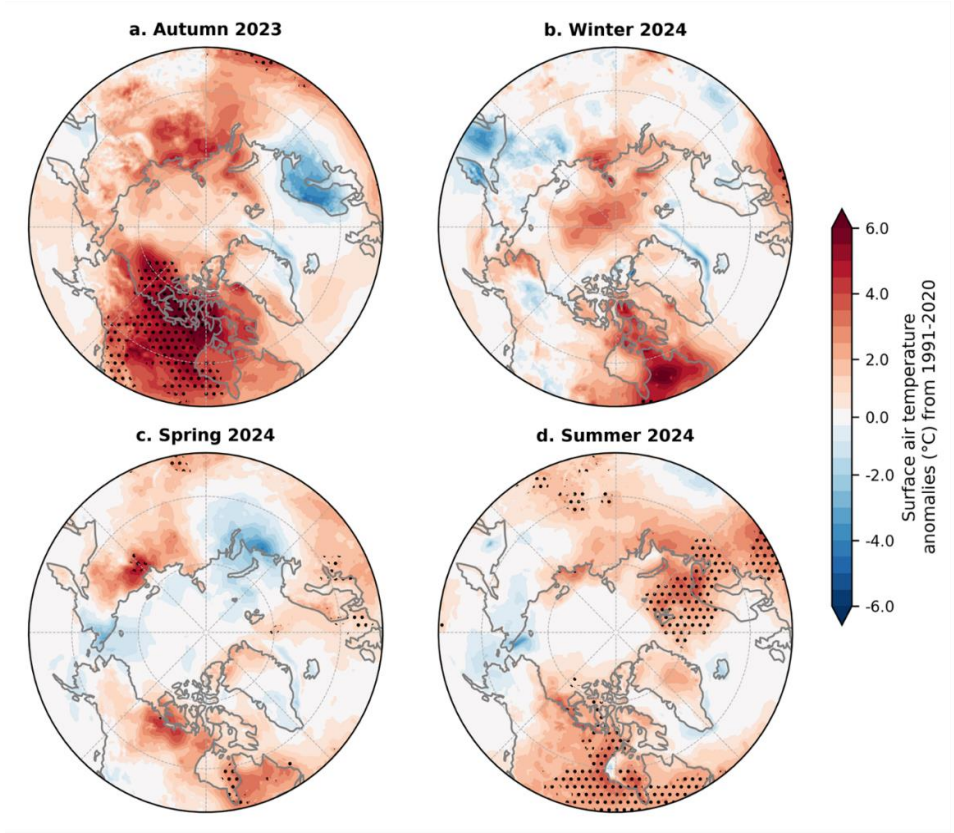
Влагосодержание полярной атмосферы по данным радиозондирований и радиометров водяного пара

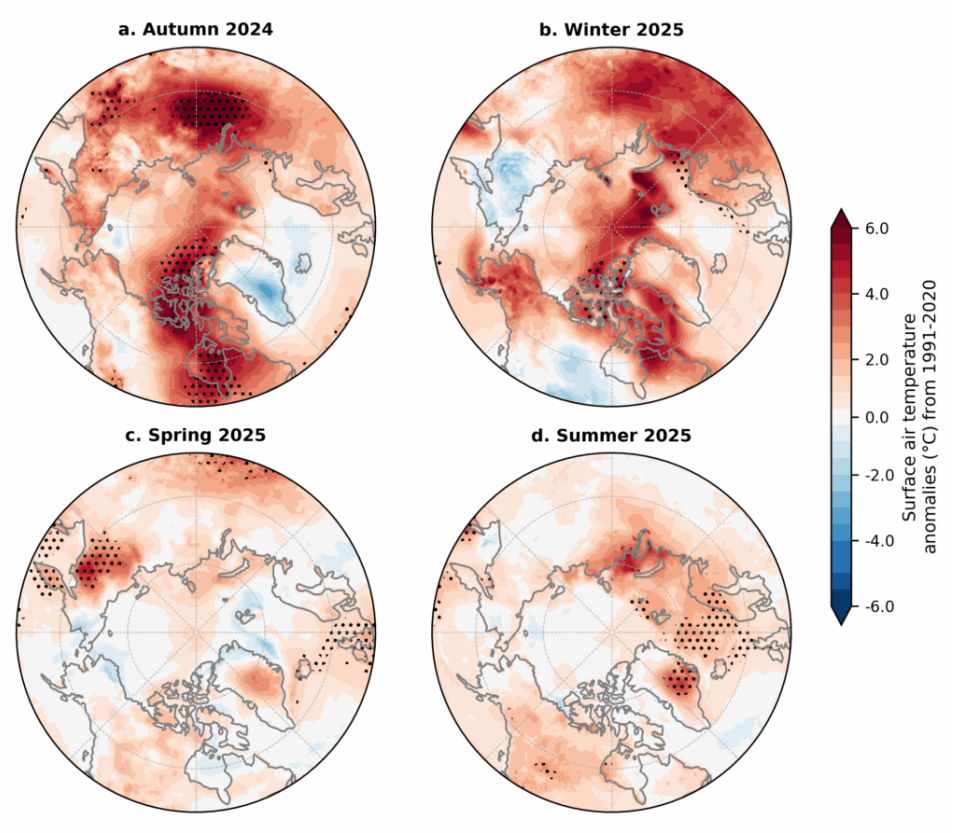
Макштас А.П.[1], Большакова И.И.[1], А.С. Масловский[1], Махотина И.А.[1], Ильин Г.Н.[2], Быков В.Ю[2]

[1] Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Росгидромет

[2] Институт прикладной астрономии РАН

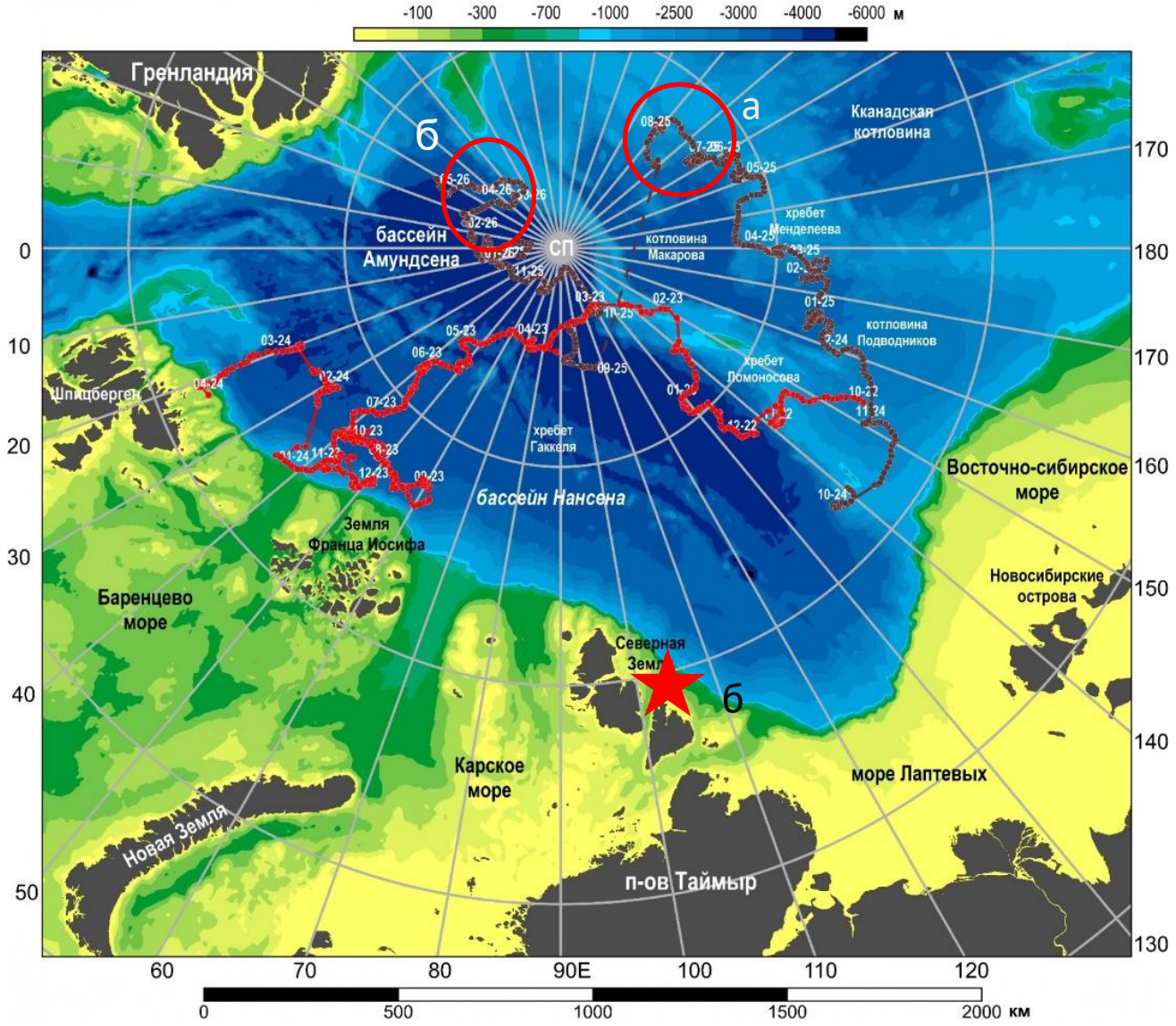
Аномалии температуры воздуха СПО относительно средних значений за 1991-2020 г.г. (реанализ ERA5)





(Arctic Record Card 2024, 2025)

Карта дрейфа станций «Северный Полюс 41» и «Северный Полюс 42»

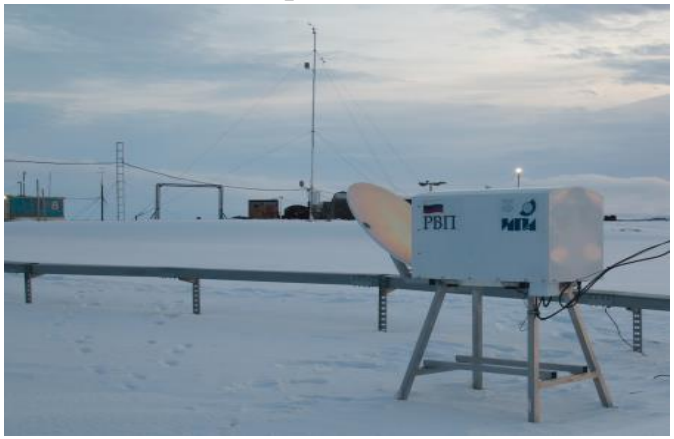


а – наблюдения летом 2025, б – наблюдения осенью 2025 и зимой 2026 года

Измерительные комплексы для исследований влагосодержания свободной атмосферы на СП-42 и НИС «Ледовая база Мыс Баранова»

Радиометр водяного пара РВП - измерения в зенит мощности нисходящего излучения атмосферы в диапазоне частот 20.7 и 31.4 ГГц с дискретностью 10 с для расчета интегрального содержания водяного пара и водосодержания облаков в вертикальном столбе единичной площади.

Система радиозондирований «Полюс» (малогабаритные зонды МРЗ-Н1) – измерения один раз в сутки вертикальных профилей атмосферного давления, направления и скорости ветра, температуры воздуха (в диапазоне от -90 до +50 ^{0}С с погрешностью не более ±0,6 °С) и относительной влажности воздуха (в диапазоне 0 до 100 % с погрешностью не более ±8 %). Постоянные времени датчика температуры не более 3 с, датчика влажности– не более 5 с. Высота зондирований – до 32 км.









Измерительные комплексы для исследований составляющих теплового баланса подстилающей поверхности на СП-42 (а) и НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (б)

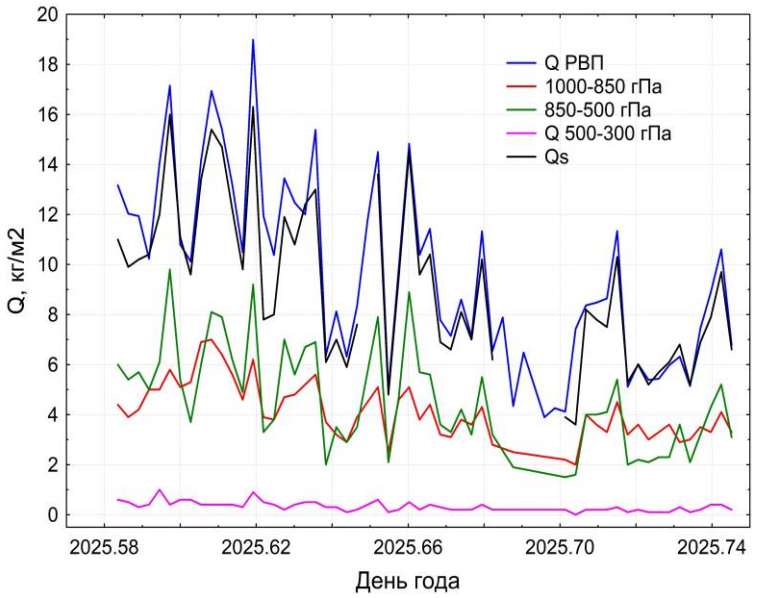


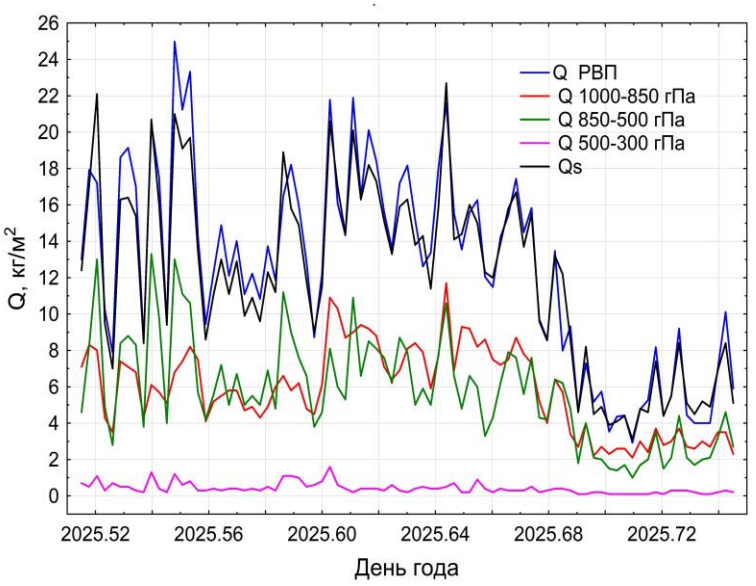


а б

Рассчитываемые составляющие теплового баланса: турбулентные потоки явного (H) и скрытого (LE) тепла; потоки приходящей (Qk) и отраженной (Rk) коротковолновой радиации, эффективное излучение подстилающей поверхности (LWU) и противоизлучение атмосферы (LWD).

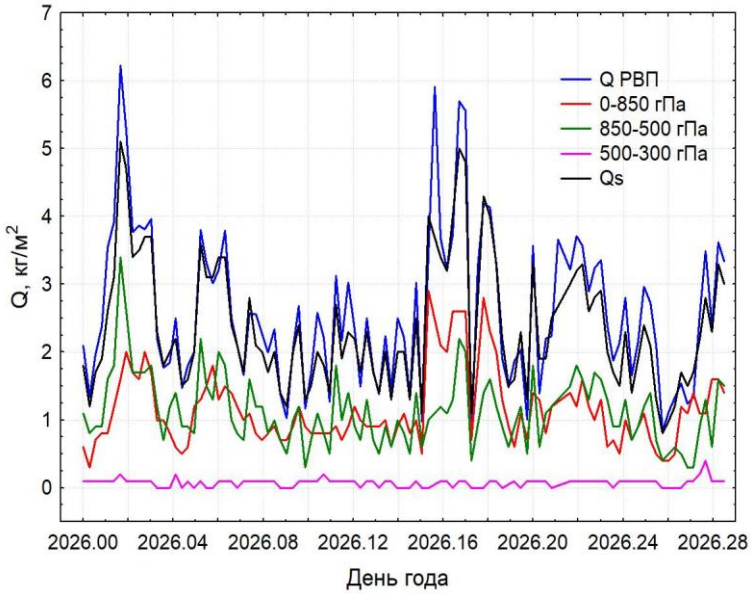
Интегральное и послойное влагосодержание атмосферы (кг/м^2) по данным одноразовых радиозондирований (Qs) и осредненных за час в срок зондирования данных РВП (Q РВП) в летний сезон 2025 г. на СП-42 (слева) и НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (справа)

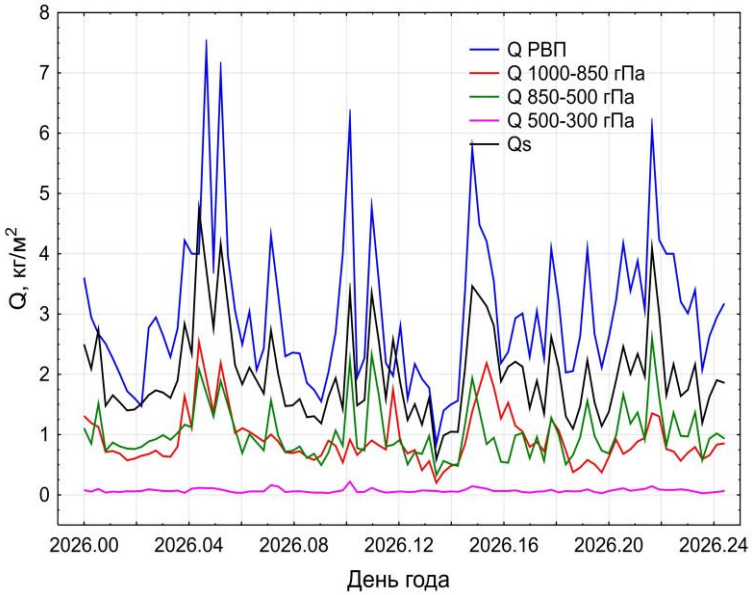




	Среднее	СКО	Q СП	Q НИС	Q 0-850 НИС	Q 850-500 НИС	Q s НИС	Q_0-850 СП	Q 850-500 СП	Q s СП
Q_СП,кг/м2	9.92	3.66	1.00	0.47	0.49	0.44	0.49	0.88	0.95	0.97
Q НИС,кг/м2	11.97	5.48		1.00	0.91	0.94	0.98	0.48	0.41	0.45
Q_0-850 НИС	5.93	2.63			1.00	0.78	0.94	0.55	0.44	0.50
Q 850-500 НИС	5.26	2.68				1.00	0.95	0.38	0.38	0.40
Qs НИС	11.60	5.18					1.00	0.49	0.43	0.48
Q_0-850 СП	4.13	1.16						1.00	0.84	0.93
Q 850-500 СП	4.60	2.09							1.00	0.98
Qs СП	9.06	3.26								1.00

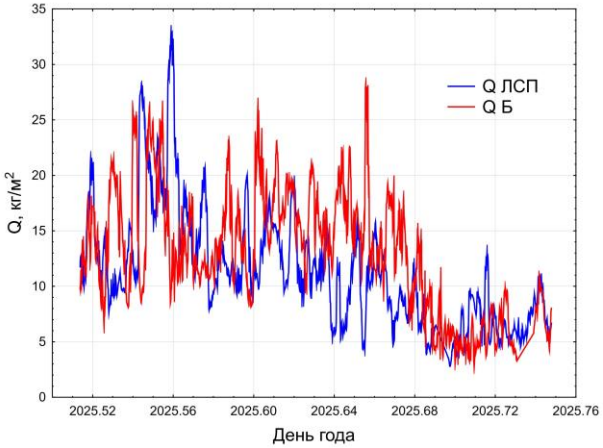
Интегральное и послойное влагосодержание атмосферы (кг/м^2) по данным одноразовых радиозондирований (Qs) и осредненных за час в срок зондирования данных РВП (Q РВП) в зимний сезон 2026 г. на СП-42 (слева) и НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (справа)



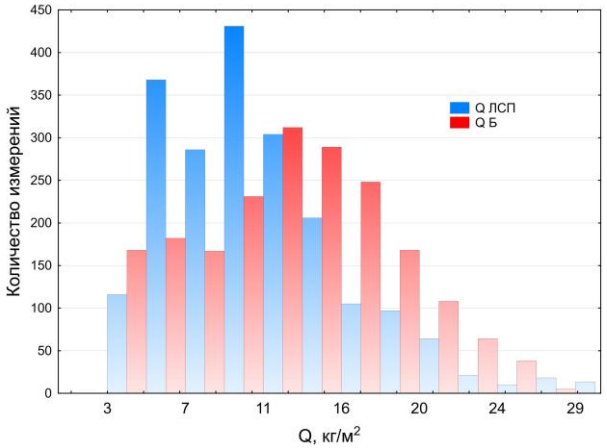


	Среднее	СКО	Q СП	Q НИС	Q 0-850 СП	Q 850-500 СП	Q s СП	Q_0-850 НИС	Q 850-500 НИС	Q s НИС
Q_СП,кг/м2	2.65	1.12	1.00	0.01	0.74	0.91	0.96	0.13	-0.06	0.03
Q НИС,кг/м2	2.93	1.15		1.00	0.03	0.06	0.05	0.57	0.85	0.85
Q_0-850 СП	1.18	0.57			1.00	0.49	0.87	0.21	-0.13	0.04
Q 850-500 СП	1.20	0.54				1.00	0.86	0.12	0.04	0.08
Qs СП	2.46	0.98					1.00	0.19	-0.06	0.07
Q_0-850 НИС	0.89	0.41						1.00	0.46	0.83
Q 850-500 НИС	1.01	0.45							1.00	0.88
Qs НИС	1.96	0.75								1.00

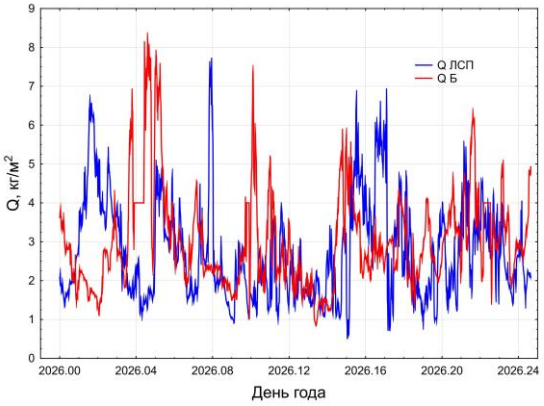
Влагосодержание атмосферы и водозапас облаков на СП-42 и НИС «Ледовая база Мыс Баранова» и их повторяемости в летний (а) и зимний (б) сезоны по данным осредненных за час измерений РВП.



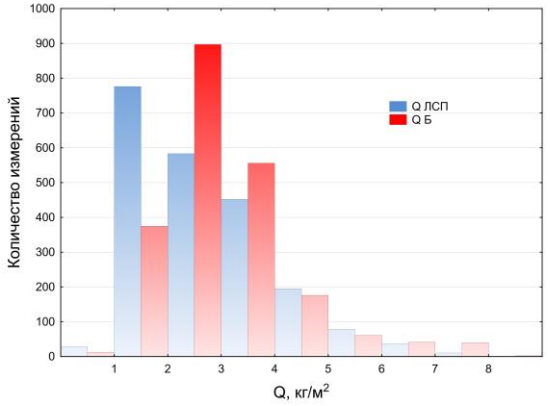
а



	Среднее	СКО	Q_ЛСП	W_ЛСП	Q НИС	W НИС
Q_ЛСП, кг/м²	11.53	5.30	1.00	0.29	0.36	0.08
W_ЛСП, кг/м²	0.08	0.17		1.00	0.03	-0.01
Q НИС, кг/м²	13.04	5.43			1.00	0.07
W НИС, кг/м²	0.09	0.24				1.00



б



	Среднее	СКО	Q_ЛСП	W_ЛСП	Q НИС	W НИС
Q_ЛСП, кг/м²	2.74	1.27	1.00	0.31	-0.02	-0.10
W_ЛСП, кг/м²	0.02	0.06		1.00	0.08	-0.05
Q НИС, кг/м²	2.97	1.25			1.00	0.05
W НИС, кг/м²	0.01	0.02				1.00

Характеристики приземного слоя атмосферы, теплового баланса подстилающей поверхности, влагосодержания и водозапаса облаков осенью 2025 г. на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (а) и СП-42 (б)

	Среднее	СКО	Ta	RH	q	Q	Rk	LWD	LWU	Hs	LE	Q	W
Ta, ^{0}C	-13.7	9.00	1.00	0.55	0.95	0.21	0.22	0.90	0.99	0.53	0.73	0.74	0.52
RH,%	85	6.57	0.55	1.00	0.61	0.04	0.05	0.68	0.60	0.55	0.41	0.55	0.50
q, кг/м^3	0.0014	0.0011	0.95	0.61	1.00	0.20	0.21	0.86	0.97	0.68	0.83	0.75	0.64
Qk Вт/м^2	1.5	8.34	0.21	0.04	0.20	1.00	1.00	0.13	0.21	0.05	0.15	0.09	0.00
Rk Вт/м^2	1.1	6.05	0.22	0.05	0.21	1.00	1.00	0.13	0.21	0.06	0.15	0.10	0.01
LWD, Вт/м^2	231.6	48.43	0.90	0.68	0.86	0.13	0.13	1.00	0.93	0.60	0.65	0.75	0.53
LWU, Вт/м^2	254.6	40.40	0.99	0.60	0.97	0.21	0.21	0.93	1.00	0.58	0.76	0.76	0.56
Hs, Вт/м^2	-5.5	24.61	0.53	0.55	0.68	0.05	0.06	0.60	0.58	1.00	0.71	0.50	0.70
LE, Вт/м^2	12.8	20.60	0.73	0.41	0.83	0.15	0.15	0.65	0.76	0.71	1.00	0.57	0.63
Q, кг/м^2	4.16	2.21	0.74	0.55	0.75	0.09	0.10	0.75	0.76	0.50	0.57	1.00	0.37
W, кг/м^2	0.05	0.12	0.52	0.50	0.64	0.00	0.01	0.53	0.56	0.70	0.63	0.37	1.00

а

	Среднее	СКО	Ta	RH	q	LWD	LWU	Hs	LE	Q	W
Ta, ^{0}C	-17.4	8.91	1.00	0.95	0.94	0.92	0.99	0.11	0.09	0.86	0.47
RH,%	85	6.61		1.00	0.93	0.87	0.94	0.15	-0.11	0.87	0.45
q, кг/м^3	0.0011	0.0010			1.00	0.88	0.95	0.11	-0.08	0.92	0.52
LWD, Вт/м^2	219.1	49.32				1.00	0.95	0.38	0.22	0.80	0.50
LWU, Вт/м^2	241.2	35.65					1.00	0.18	0.12	0.87	0.49
Hs, Вт/м^2	-10.5	11.23						1.00	0.28	0.10	0.10
LE, Вт/м^2	3.2	3.53							1.00	-0.06	0.05
Q, кг/м^2	4.30	2.88								1.00	0.50
W, кг/м^2	0.03	0.08									1.00

б

Характеристики приземного слоя атмосферы, теплового баланса подстилающей поверхности, влагосодержания и водозапаса облаков зимой 2026 г. на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (а) и СП-42 (б)

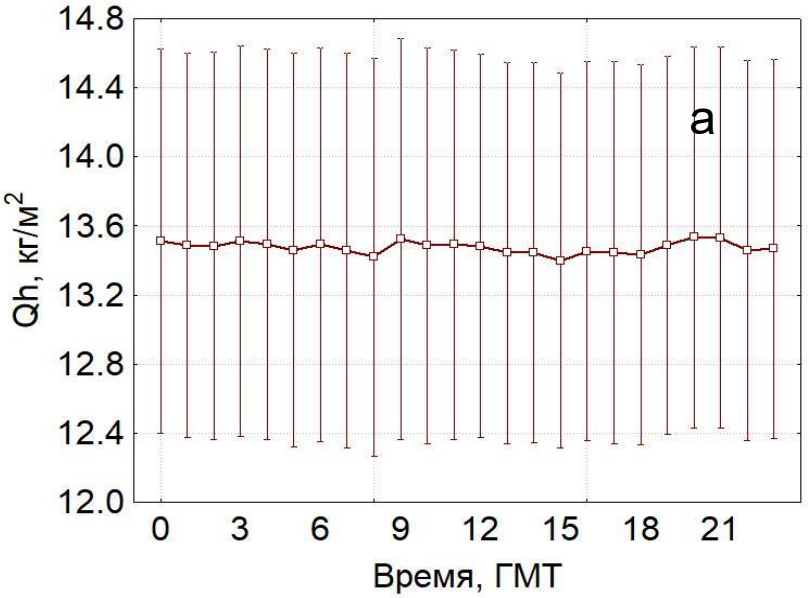
	Среднее	СКО	Ta	RH	q	LWD	LWU	Hs	LE	Q	W
	-24.6	5.02	1.00	0.99	0.93	0.76	0.96	-0.05	0.32	0.72	0.12
Ta, ^{0}C	81	3.84		1.00	0.92	0.76	0.96	-0.06	0.32	0.71	0.11
RH,%	0.0005	0.0003			1.00	0.71	0.92	-0.04	0.34	0.72	0.23
q, кг/м^3	180.53	31.04				1.00	0.85	0.17	0.52	0.75	0.10
LWD, Вт/м^2	208.93	19.91					1.00	-0.11	0.48	0.78	0.13
LWU, Вт/м^2	-16.50	15.24						1.00	-0.05	-0.03	0.03
Hs, Вт/м^2	1.90	3.40							1.00	0.58	0.04
LE, Вт/м^2	2.97	1.26								1.00	0.05
Q, кг/м^2	0.01	0.02									1.00

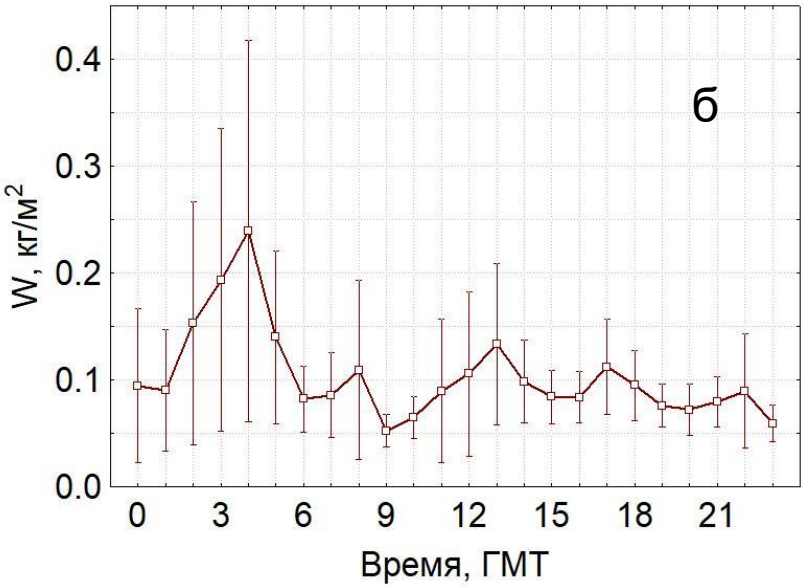
а

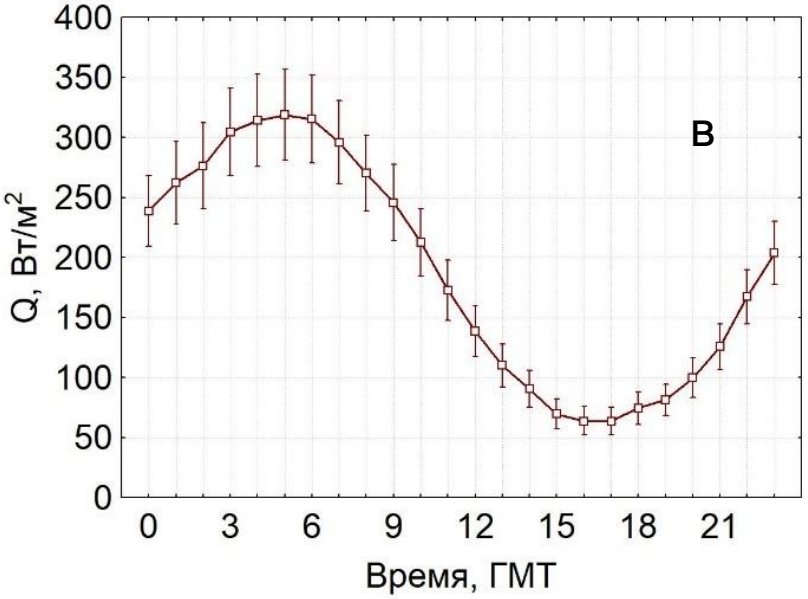
	Среднее	СКО	Ta	RH	q	LWD	LWU	Hs	LE	Q	W
Ta, ^{0}C	-24.5	7.42	1.00	0.90	0.94	0.86	0.99	-0.20	0.54	0.60	0.41
RH,%	79	5.01		1.00	0.88	0.79	0.89	-0.10	0.35	0.55	0.37
q, кг/м^3	0.0005	0.0005			1.00	0.79	0.94	-0.27	0.46	0.56	0.40
LWD, Вт/м^2	189.0	41.89				1.00	0.90	0.22	0.63	0.60	0.47
LWU, Вт/м^2	214.7	27.69					1.00	-0.12	0.58	0.61	0.43
Hs, Вт/м^2	-10.8	12.51						1.00	0.23	0.05	0.12
LE, Вт/м^2	2.9	3.23							1.00	0.35	0.38
Q, кг/м^2	2.72	1.26								1.00	0.31
W, кг/м^2	0.02	0.06									1.00

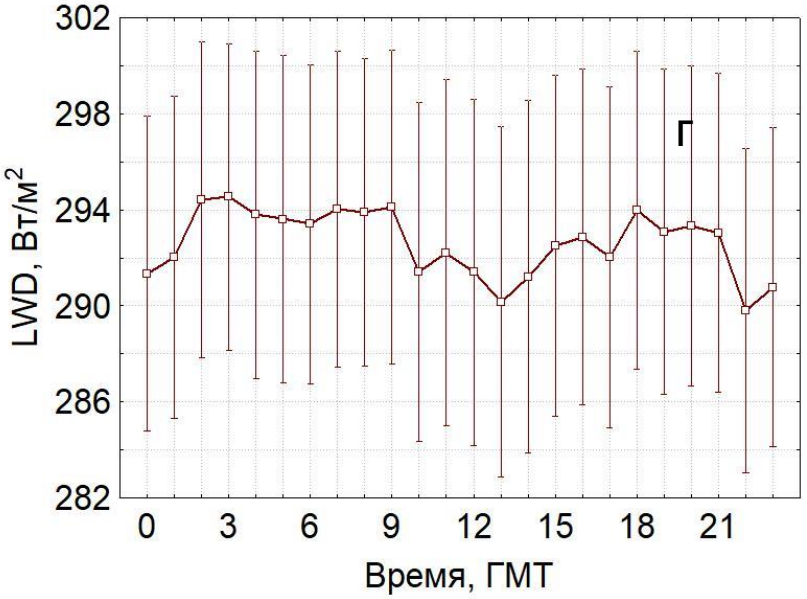
б

Суточный ход осредненных за июль для каждого часа значений интегрального влагосодержания Qh (а), водозапаса облаков W (б), приходящих коротковолновой Q (в) и длинноволновой LWD (г) радиации

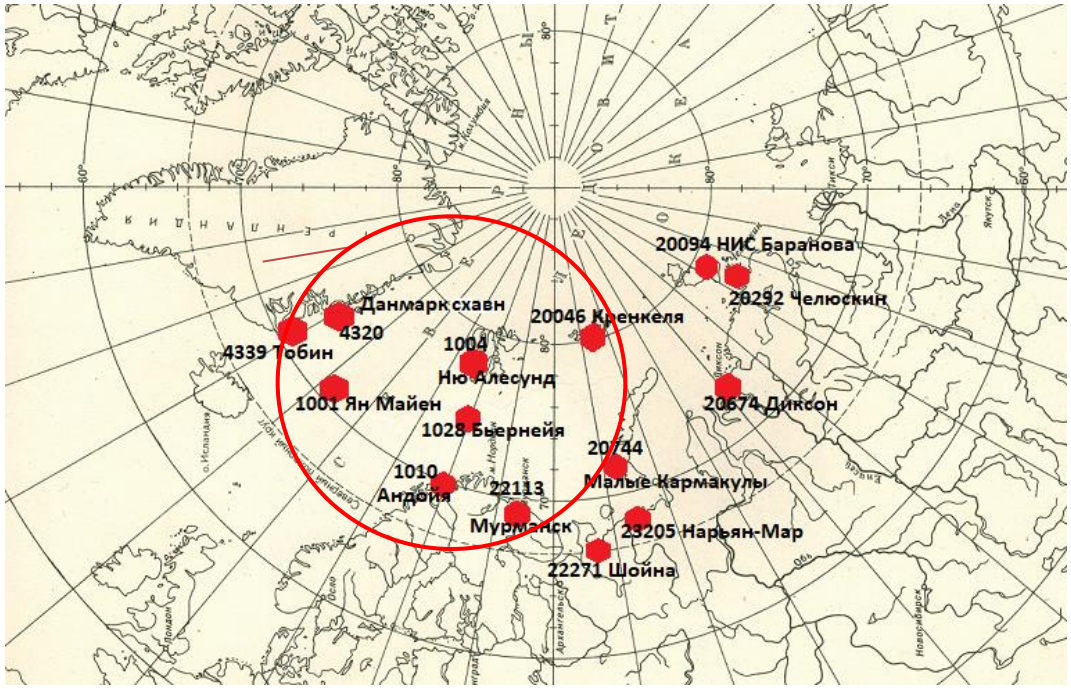






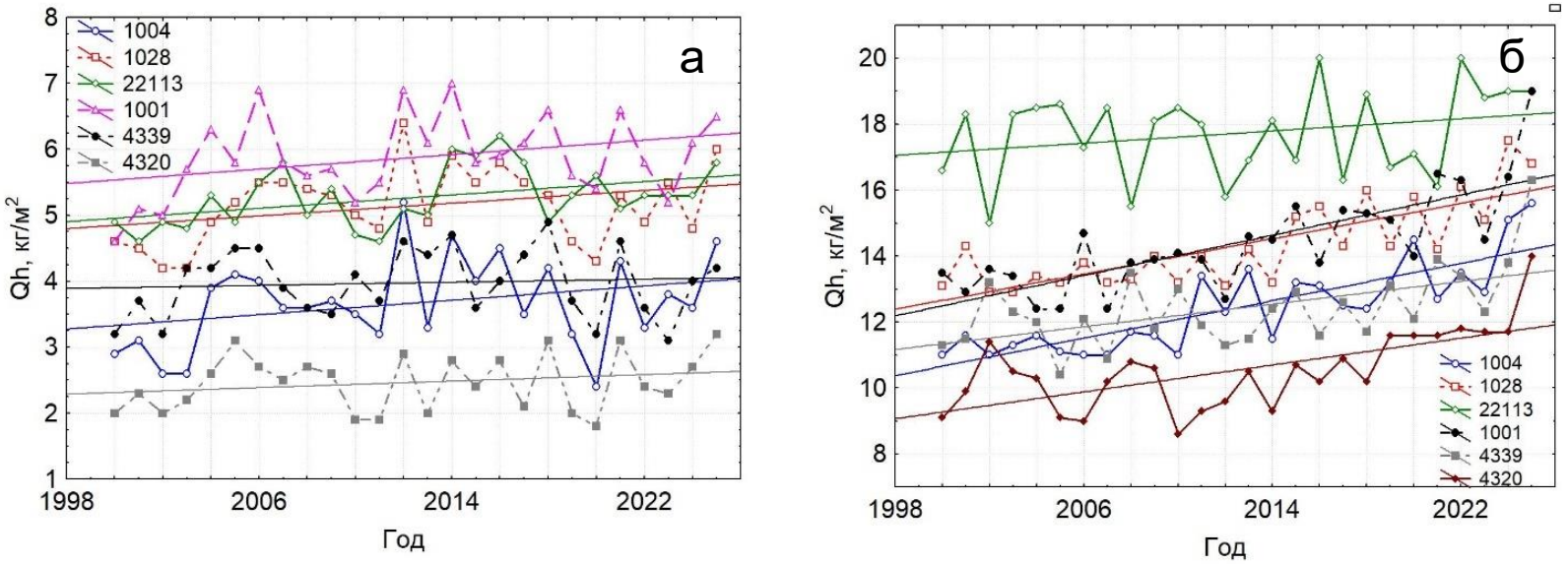


Мониторинг характеристик климата свободной атмосферы Западной Арктики по данным сети станций радиозондирований

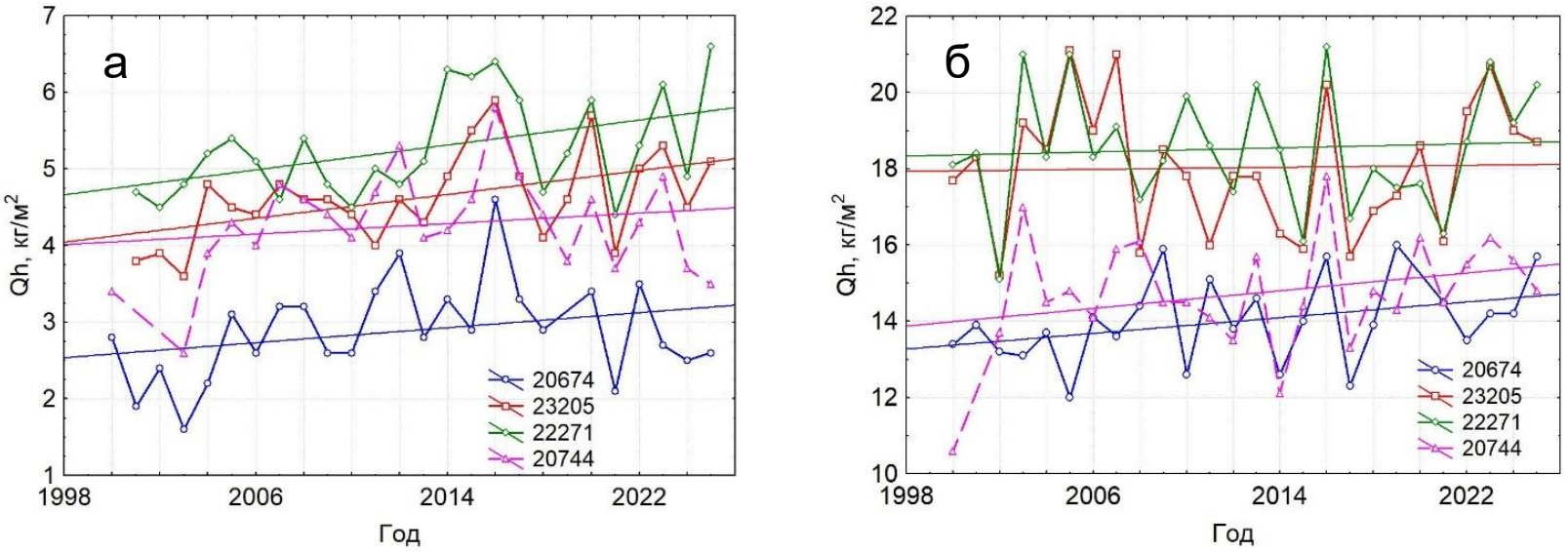


Синоптический индекс станции	Наименование	Долгота°	Широта°	Высота м	Период наблюдений, годы
4320	Данмарксхавн	341.22	7675	12	1962-2025
4339	Тобин	338.02	7047	66	1990-2025
1001	Ян Майен	351.32	7092	9	1962-2025
1004	Ню Алесунд	11.92	78.92	15	1993-2025
1028	Бьернейя	19.00	74.50	14	1957-1960;1964-2025
1010	Андойя	16.13	69.31	10	2014(XI-XII)-2025
22113	Мурманск	33.16	68.98	121	1939-2025
20046	Кренкеля (Хейса)	58.03	80.60	20	1958-1997; 2009-2025
20094	НИС Баранова	101.62	79.28	24	2013(IX-XII)-2025
20292	Челюскин	104.27	77.70	16	1949-1997; 2009-2025
20674	Диксон	80.22	73.50	46	1949-1984;1987-2025
20744	Малые Кармакулы	52.72	72.37	19	1951-1960;1967-1996; 2002-2025
22271	Шойна	44.12	67.87	10	1953-2025
23205	Нарьян-Мар	53.00	67.63	5	1949-2025

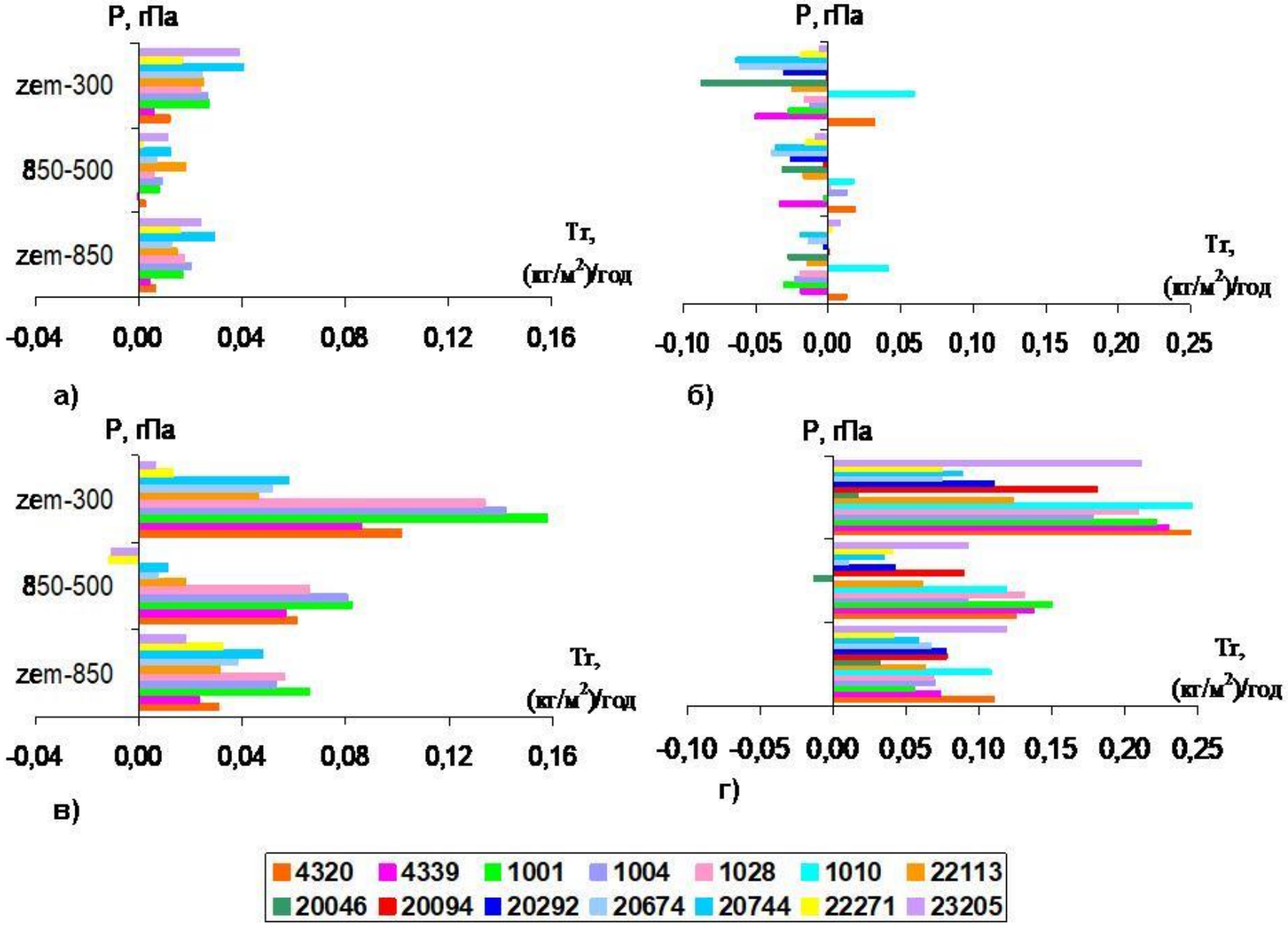
Интегральное влагосодержание атмосферы западной части региона (выделен на предыдущем слайде) в зимний (а) и летний (б) сезоны.



Интегральное влагосодержание атмосферы восточной части региона в зимний (а) и летний (б) сезоны.



Тренды интегрального влагосодержания атмосферы и влагосодержания в слоях подстилающая поверхность – 850 гПа и 850 – 500 гПа для периодов 2000 г.–2025 гг. (а, в) и 2013 – 2025 г.г. (б, г) в зимний (а, б) и летний (в, г) сезоны



Коэффициенты линейного тренда Tr (кг $м^{-2}$/год) и коэффициенты детерминации R^2 интегрального (Qh) и по слоям влагосодержания атмосферы в зимний и летний сезоны по данным аэрологических станций Западной Арктики.

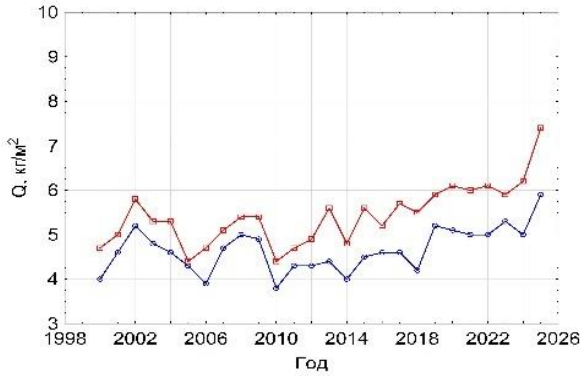
Синоптический индекс станции	Зима Период 2000-2025 г.г.						Лето Период 2000-2025 г.г.					
	zem-850 гПа		850-500гПа		Qh		zem-850гПа		850-500гПа		Qh	
	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2
4320	0,007	0,065	0,003	0,007	0,012	0,049	0,031	0,224	0,061	0,485	0,102	0,425
4339	0,004	0,020	0,000	0,000	0,006	0,008	0,024	0,158	0,057	0,362	0,086	0,301
1001	0,017	0,139	0,008	0,046	0,027	0,114	0,066	0,527	0,083	0,581	0,158	0,603
1004	0,020	0,141	0,009	0,055	0,142	0,092	0,053	0,537	0,081	0,722	0,142	0,676
1028	0,018	0,129	0,006	0,039	0,024	0,106	0,056	0,576	0,066	0,550	0,134	0,628
22113	0,015	0,273	0,018	0,034	0,025	0,187	0,031	0,167	0,018	0,034	0,046	0,070
20674	0,013	0,093	0,007	0,034	0,025	0,085	0,039	0,219	0,007	0,012	0,052	0,130
22271	0,030	0,386	0,013	0,083	0,041	0,205	0,048	0,251	0,011	0,012	0,058	0,082
20744	0,016	0,091	0,002	0,002	0,017	0,034	0,032	0,090	-0,012	0,012	0,014	0,004
23205	0,024	0,338	0,012	0,103	0,039	0,238	0,018	0,028	-0,011	0,009	0,007	0,001

Данмаркскхавн
Тобин
Ян Майен
Ню Алесунд
Бьернейя
Мурманск

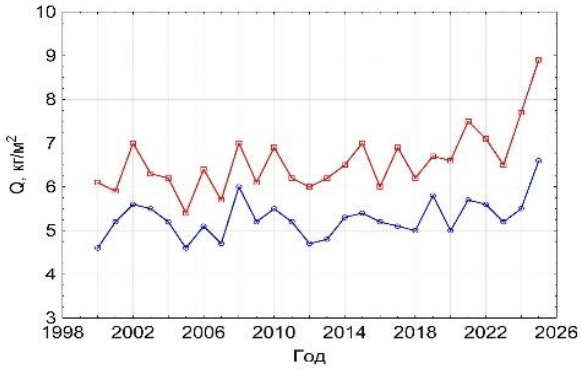
Синоптический индекс Станции	Зима Период 2013-2025г.г.						Лето Период 2013-2025г.г.					
	zem-850 гПа		850-500 гПа		Qh		zem-850гПа		850-500 гПа		Qh	
	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2	Tr	R^2
4320	0,013	0,041	0,018	0,099	0,032	0,070	0,110	0,705	0,126	0,644	0,245	0,700
4339	-0,019	0,069	-0,034	0,188	-0,051	0,120	0,074	0,380	0,138	0,475	0,230	0,478
1001	-0,031	0,132	-0,003	0,004	-0,028	0,043	0,056	0,139	0,150	0,541	0,221	0,391
1004	-0,023	0,047	0,013	0,029	-0,013	0,005	0,070	0,244	0,092	0,430	0,179	0,379
1028	-0,019	0,046	0,001	0,000	-0,017	0,015	0,069	0,296	0,131	0,509	0,209	0,460
1010	0,041	0,255	0,017	0,033	0,059	0,111	0,108	0,421	0,119	0,481	0,246	0,480
22113	-0,014	0,153	-0,017	0,058	-0,025	0,055	0,063	0,178	0,062	0,097	0,124	0,122
20046	-0,028	0,096	-0,032	0,182	-0,087	0,201	0,032	0,056	-0,013	0,009	0,017	0,004
20094	0,001	0,000	-0,003	0,006	-0,001	0,000	0,078	0,171	0,090	0,335	0,181	0,267
20292	-0,003	0,004	-0,026	0,132	-0,031	0,058	0,078	0,150	0,042	0,035	0,110	0,069
20674	-0,014	0,039	-0,040	0,220	-0,062	0,154	0,067	0,147	0,011	0,008	0,075	0,069
20744	-0,020	0,077	-0,036	0,198	-0,064	0,154	0,059	0,086	0,035	0,048	0,089	0,059
22271	0,003	0,001	-0,015	0,026	-0,019	0,011	0,041	0,035	0,041	0,038	0,075	0,029
23205	0,008	0,012	-0,009	0,015	-0,006	0,002	0,119	0,263	0,093	0,218	0,212	0,239

Данмаркскхавн
Тобин
Ян Майен
Ню Алесунд
Бьернейя
Андойя
Мурманск

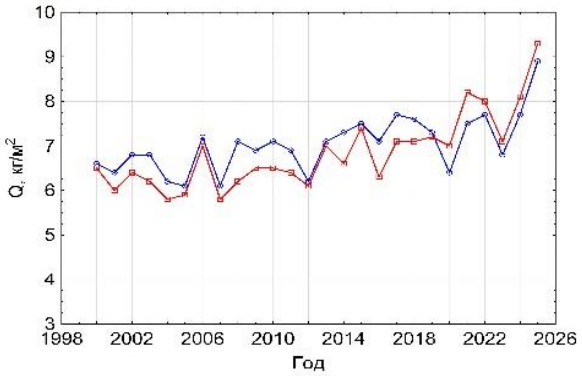
Влагосодержание атмосферы в слоях подстилающая поверхность – 850 гПа (синие линии) и 850 – 500 гПа (красные линии) на станциях Гренландского и Баренцева морей в летний сезон



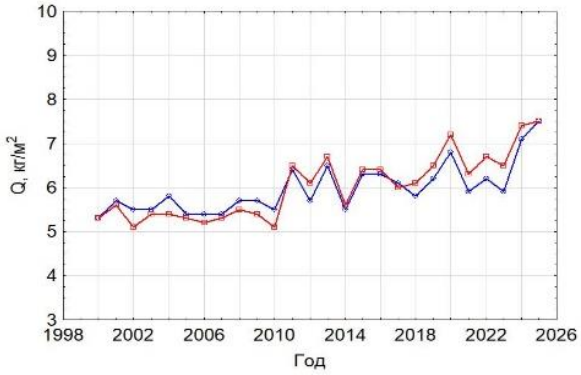
Данмаркскхавн



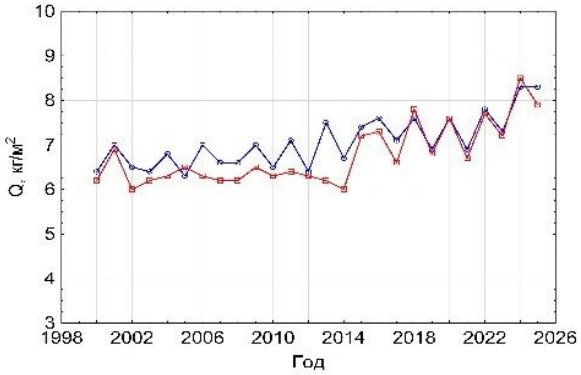
Тобин



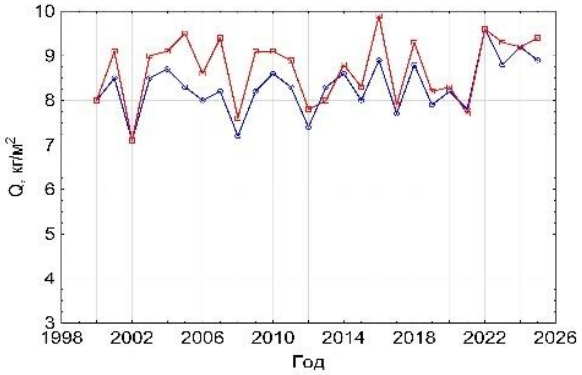
Ян Майен



Ню-Алесунд



Бьернейя



Мурманск

Краткие выводы

На основе сравнения данных непрерывных измерений интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА), выполненных в 2025 - 2026 годах с помощью радиометра водяного пара РВП и данных аэрологических зондирований показано, что, максимальное расхождение между оценками средних за сезоны ИВА наблюдается зимой, когда влагосодержание атмосферы минимально и часто находится на уровне погрешности измерений. Но даже в этот сезон расхождение не превышает 0,97 кг/м^2 при среднеквадратическом отклонении 1.12 кг/м^2 и значимом коэффициенте корреляции 0.85.

Выявлено практически синхронное изменение влагосодержания в слоях подстилающая поверхность–850 гПа и 850 – 500 гПа, подтверждаемое высокими коэффициентами корреляции (0.82 – 0.85) и близкими средними значениями. Это свидетельствует как о адвективном переносе относительно однородных по высоте воздушных масс, так и о достаточно интенсивном перемешивании на границе пограничного слоя атмосферы и нижней тропосферы. В зимний сезон коэффициенты корреляции между слоями уменьшаются величин порядка 0.5. Вероятно, это связано с наличием преимущественно устойчивого пограничного слоя зимой, обусловленного радиационным выхолаживанием подстилающей поверхности, препятствующему процессам влагообмена между слоями.

Анализ данных измерений, осредненных за каждый час, не выявил суточного хода величины ИВА даже в июле, месяце максимального суточного хода солнечной радиации, что важно при оценке адекватности сопоставления осредненных за сезон данных аэрологической наблюдений, выполняемых на сети станций в 0 ГМТ, но в разное солнечное время.

На основе алгоритма расчета ИВА по данным радиозондирований получены оценки пространственно – временной изменчивости влагосодержания для станций, выполнявших аэрологические наблюдения в западном секторе Арктики в 2000 – 2025 годах. При рассмотрении трендов за периоды 2000 – 2025 гг. и 2013–2025 гг. показано, что тенденция к увеличению ИВА имела место в летний сезон на всех станциях Баренцева и Карского морей в оба периода, особенно на станциях, расположенных на побережье и островах Гренландского моря (Данмаркскавн, Тобин, Ян-Майен, Ню-Алесун и Бьернейя). При этом значения трендов для периода 2013–2025 гг. по сравнению с периодом 2000 – 2025 гг. были примерно в 2 раза больше, до 0,246 $\text{кгм}^{-2}/\text{год}$. В зимний сезон в 2013–2025 гг. тренды ИВА были отрицательными на всех станциях, за исключением побережья Гренландии (станция Данмаркскавн). Абсолютные значения тренда зимой не превышали 0,08$\text{кгм}^{-2}/\text{год}$.

На станциях Данмаркскавн и Тобин в слое 850 – 500 гПа влагосодержание в летний период примерно на 20% превышало влагосодержание в слое подстилающая поверхность – 850 гПа, в то время как на островных станциях вклад обоих слоев в ИВА был практически равным. Это связано с тем, что влагосодержание и его межгодовые изменения в первом случае в большей степени определялись крупномасштабным переносом теплых и, соответственно, влажных воздушных масс с юго- и юго-западных направлений над районом, находящимся под влиянием холодного Восточно-Гренландского течения, а во втором (на островных станциях) - теплого Норвежского Атлантического течения. Это обусловило более высокие среднесезонные температуры на уровнях подстилающая поверхность и 850 гПа на станции Ян Майен (5.9 ºС и 1.5 ºС) относительно станций Тобин (4.6 ºС и 0.5 ºС) и Данмаркскавн (2.0 ºС и -1.5 ºС) и, соответственно, больший вклад процессов испарения с поверхности моря в величину влагосодержания в слое подстилающая поверхность – 850 гПа.