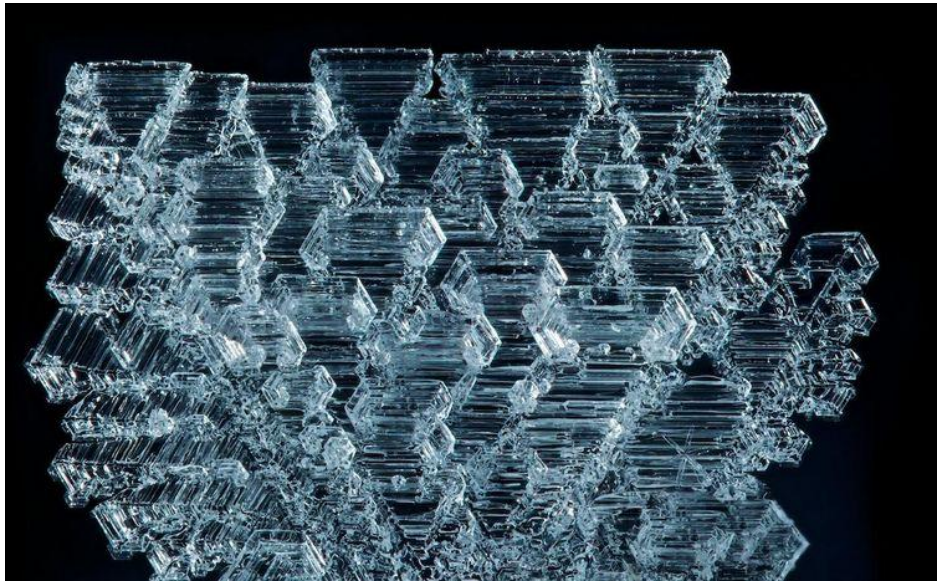
Застосування супутникових спостережень для досліджень снігового і льодового покриву

(кліматологія, гідрометеорологія, безпека, ресурси)



Основні задачі для застосування даних ДЗЗ: льодовий покрив

Моніторинг обсягу і потужності льодового покриву (глобальний і регіональний):

Вивчення міжрічної мінливості і аномалій температур;

Оцінка запасів опадів для аналізу довгострокової мінливості динаміки опадів;

Вивчення варіацій танення для аналізу припливу прісної води в океан з метою оцінки впливу на течії.

Забезпечення навігації (регіональний і локальний рівень):

Супроводження судноплавства в зонах льодоставу;

Визначення небезпеки окремих айсбергів

Основні задачі для застосування даних ДЗЗ: сніговий покрив

Моніторинг обсягу і потужності снігового покриву (глобальний і регіональний):

Вивчення міжрічної мінливості і аномалій температур;

Оцінка запасів опадів для аналізу довгострокової мінливості динаміки опадів;

Дослідження вічної мерзлоти.

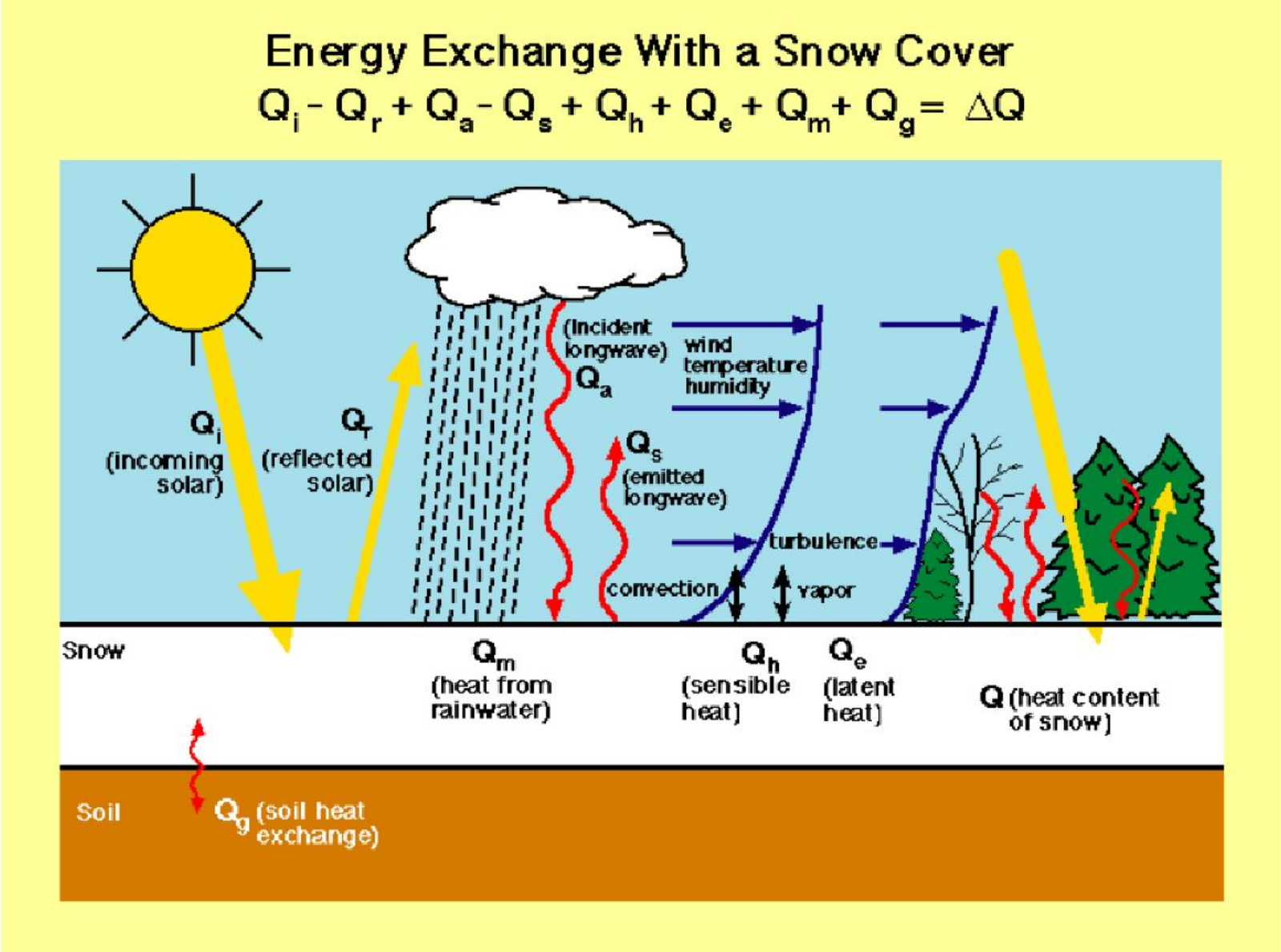
Вивчення міжрічної мінливості снігозапасів і динаміки снігового покриву (регіональний і локальний):

Аналіз сніготанення з метою прогнозування динаміки водного балансу територій и прогнозування надзвичайних ситуацій;

Прогнозування біологічної продуктивності ландшафтів (аналіз промерзання ґрунту та динаміка вологонасичення);

Визначення напрямку регіональних кліматичних змін за динамікою переміщення вологих повітряних мас.

Енергетика снігового покриву



Модель снігового покриву

Рівняння енергетичного балансу снігового покриву

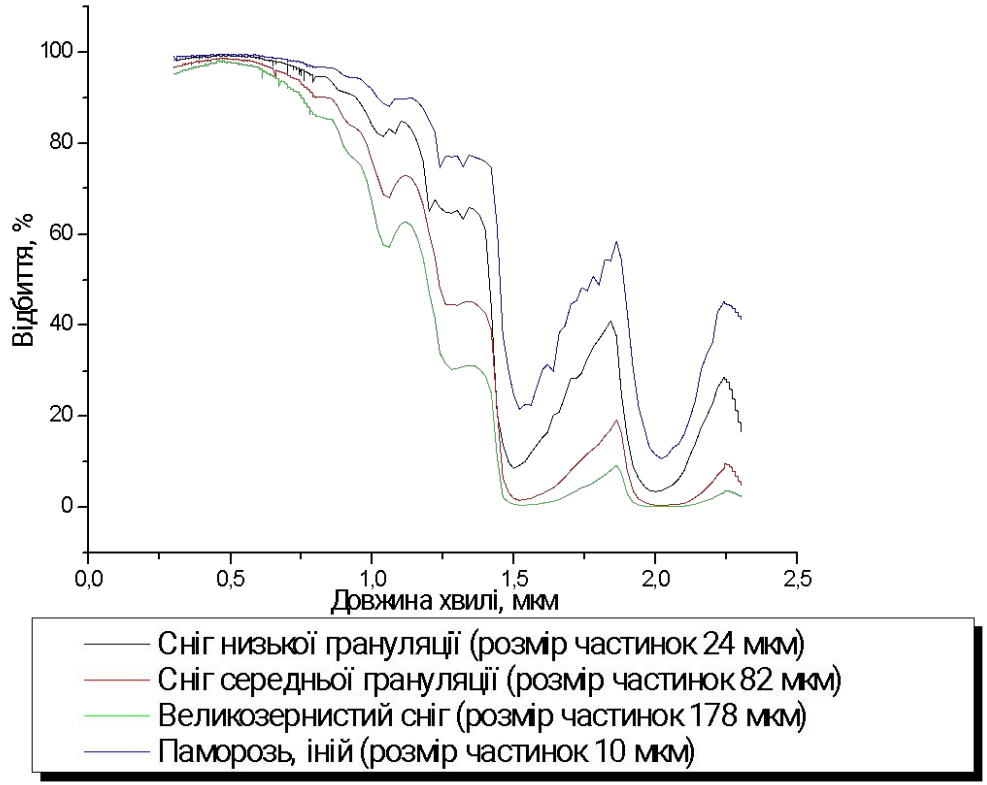
$$\varepsilon_0 - \varepsilon_z - L_{wv}E - \rho_w M L_{iw} = z\rho_s (c_p)_i \frac{\partial \overline{T}}{\partial t}$$

$$\varepsilon_0 - \varepsilon_z - L_{wv}E = (R_n)_z - (R_n)_0 + \\ + H_0 - H_z + P_0 - P_z - L_{wv}E$$

Потоки тепла Hz і водяної пари E з поверхні покриву

$$H = -\rho_a (c_p)_a k^2 \frac{\Phi_M U(T_\alpha - T_z)}{\Phi_H (\ln(h/z))^2}$$

$$E = -\rho_a k^2 \frac{\Phi_M}{\Phi_E} \frac{U(q_a - q_z)}{(\ln(h/z_0))^2}$$



Радіаційний потік

$$(R_n)_z = S_{in} - S_{out} + L_{in} - L_{out}$$

Опромінення поверхні

$$Q = Q^* f(\cos\Pi \cos\Omega \cos\gamma + \sin\Pi \sin\gamma)$$

загальна радіація (Rn); турбулентний перенос (H E); тепло, що надходить з дощовими опадами (Pz); тепло, що надходить із підстилаючої породи конвективним шляхом (P0); П - широта; Ω - часовий кут; γ - нахил сонця; Q* - сонячна константа (1395 Дж/м2); k – константа Ван – Кармана; ФМ, ФН, ФЕ – функції Моніна – Обухова; z0 – ступінь аеродинамічної шорсткості снігу; Tz і qz – температура і питома вологість поверхні снігового покриву

Модель танення снігу

Модель сніготанення

$$\overline{M} = c_{24}(\overline{T_a} - T_{s\tan d24})$$

Середня температура за добу

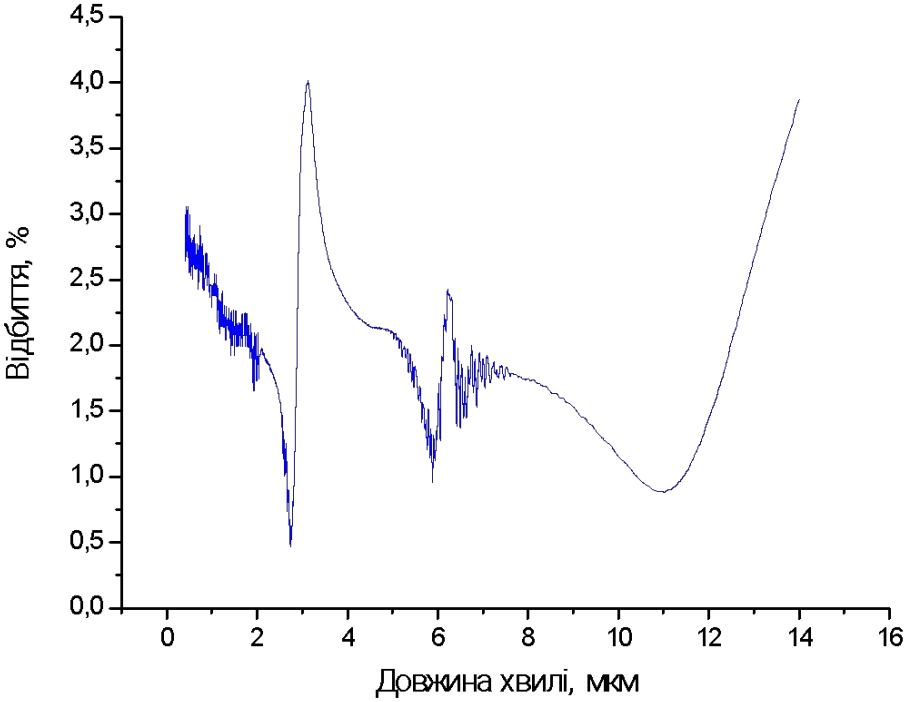
$$\overline{T_a} = \frac{(T_a)^2_{\max} - (T_a)^2_{\min.1}}{4\{(T_a)_{\max} - (T_a)_{\min.1}\}} + \frac{(T_a)^2_{\max} - (T_a)^2_{\min.2}}{4\{(T_a)_{\max} - (T_a)_{\min.2}\}}$$

Зниження снігового покриву

$$T_a = T_0 - \Gamma(h - h_0)$$

Зміна площі покриву

$$A_s(t+1) = \{A_s(t) - \overline{M}\frac{A_s(0)}{Z(0)}\}^{1/2}$$



Стік талої води

$$V(t+1) - V(t) = \overline{M}(t)A_s(t) + \overline{I_w}(t)A - F(t)$$

$$F(t+1) = \frac{(\xi - 1)}{\xi}F(t) + \overline{M}(t)\frac{A_s(t)}{\xi} + \overline{I_w}(t)\frac{A}{\xi}$$

M - середня швидкість танення снігу; Г - аеротермічний градієнт; As -площа покриву; Z(0) –початкова середня товщина снігового покриву; ξ – коефіцієнт регулювання для ємнісних моделей

Модель динаміки снігових запасів

Рівняння надходження води

$$\frac{dX}{dt} = R - h_m$$

Динаміка снігозапасів і водовіддачі

$$h_m = \begin{cases} [z_n - \gamma_n(1 - z_n)]X - [z_{n-1} - \gamma_{n-1}(1 - z_{n-1})]X, \\ 0, z_n \le z_0 \end{cases}$$

Інтенсивність танення снігу

$$z_n = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_{ci}}{X},$$

Зменшення запасів снігу

$$z_0 = \begin{cases} 0{,}34\gamma_{\max} + 0{,}059, \gamma_{\max} \le 0{,}28, \\ 0{,}25\gamma_{\max} + 0{,}083, \gamma_{\max} > 0{,}28 \end{cases}$$

Модель танення снігу

$$\frac{dX}{dt} = r_1 - r_2,$$

$$r_1 = \begin{cases} R, T < 0, \\ 0, T \ge 0, \end{cases}$$

$$r_2 = \begin{cases} 0, T < 0, \\ X, T \ge 0 \end{cases}$$

Подача води на поверхню водозбору *I* за час *Δt*

$$I = (1 - f)h_m + R$$

X – водний еквівалент снігового покриву, *R* - інтенсивність опадів, *hm* - інтенсивність вологовіддачі снігу; *zn* та *zn-1* – відносні величини танення снігу за даний та попередній інтервали часу, *z0* - значення відносного зменшення снігу, за якого починається водовіддача, *γn* - поточна вологомісткість снігу; *hci=aTi* – шар танення снігу в інтервал часу *i*, *a* - середній коефіцієнт танення, *Ti* - температура повітря в інтервал часу *i*, *n* - номер розрахункового шагу від моменту початку танення снігу; *γmax* – максимальна вологоємність снігу (*γmax=exp(-4ρ)-0,04*), *ρ*- щільність снігу до початку танення; *r1* – надходження з атмосферний опадів, *r2* - віддача води із снігового покриву, *R* - шар опадів, *T* - середня за місяць температура повітря

Система супутникового спостереження льодового і снігового покриву

Назва системи: Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS)

Власник/Розробник системи: National Oceanic and Atmospheric Administration’s National Environmental Satellite Data and Information Service (NOAA/NESDIS)

Контрольовані параметри: розподіл снігового та льодового покриву, відносний вік снігу і льоду, потужність, водний еквівалент, щільність

Роздільна здатність системи: від 1 до 4км просторова, від 3 до 6 годин по метеорологічній моделі, 1 день, 1 тиждень по спостереженням

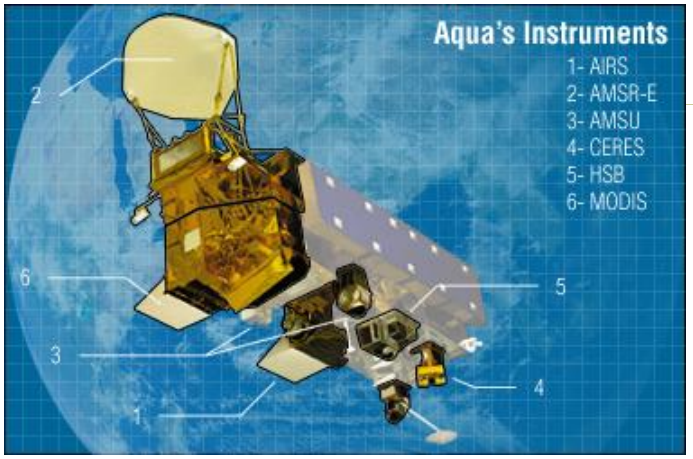
Історія створення і функціонування системи: експерименти з 1975, старт системи – 1994, стале функціонування – з 2002

Перелік основних приладів для дослідження снігового і льодового покриву

платформа	власник	сенсор	запуск
NOAA-19, /MetOp-A	NOAA/USA	**AVHRR** (Advanced Very High Resolution Radiometer)	2009
EOS PM (Aqua)	NOAA/USA	**MODIS** (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)	2002
NOAA-19, /MetOp-A	NOAA/USA	**AMSU-A** (Advanced Microwave Sounding Unit - EOS)	1994
EOS PM (Aqua)	NOAA/USA	**AMSU-B** (Advanced Microwave Sounding Unit - EOS)	2002
METEOSAT /MSG	EUMETSAT	**SEVIRI** (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager)	2005

Характеристики основних приладів

Характеристики сенсору AVHRR



Номер каналу	Роздільна здатність	Довжина хвилі, мкм	Використання
1	1.09 km	0.58 - 0.68	Хмарний покрив, ґрунтовий покрив
2	1.09 km	0.725 - 1.00	Взаємодія вода - суходіл
3A	1.09 km	1.58 - 1.64	Аналіз снігу і льоду
3B	1.09 km	3.55 - 3.93	Хмари, температура водної поверхні
4	1.09 km	10.30 - 11.30	Хмари, температура водної поверхні
5	1.09 km	11.50 - 12.50	Температура водної поверхні і суходолу

Радіометричні характеристики AMSU

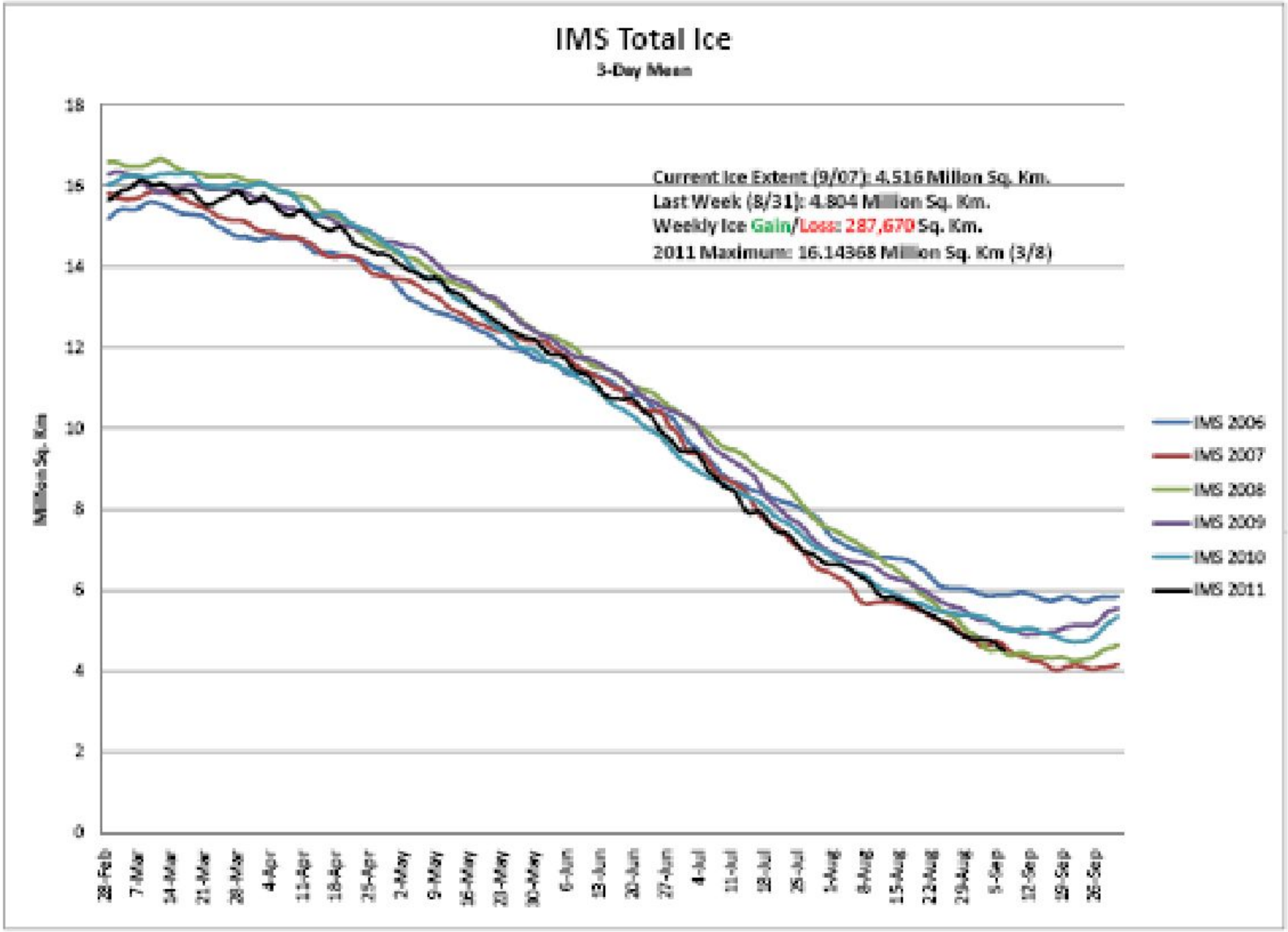
Номер каналу	Частота, GHz	Поляризація	Кількість полос	Чутливість, К
16	89.9 ± 0.9	V	2	0.37
17	150 ± 0.9	V	2	0.84
18	183.31 ± 1.00	V	2	1.06
19	183.31 ± 3.00	V	2	0.70
20	183.31 ± 7.00	V	2	0.60

Вивчення динаміки льодового покриву

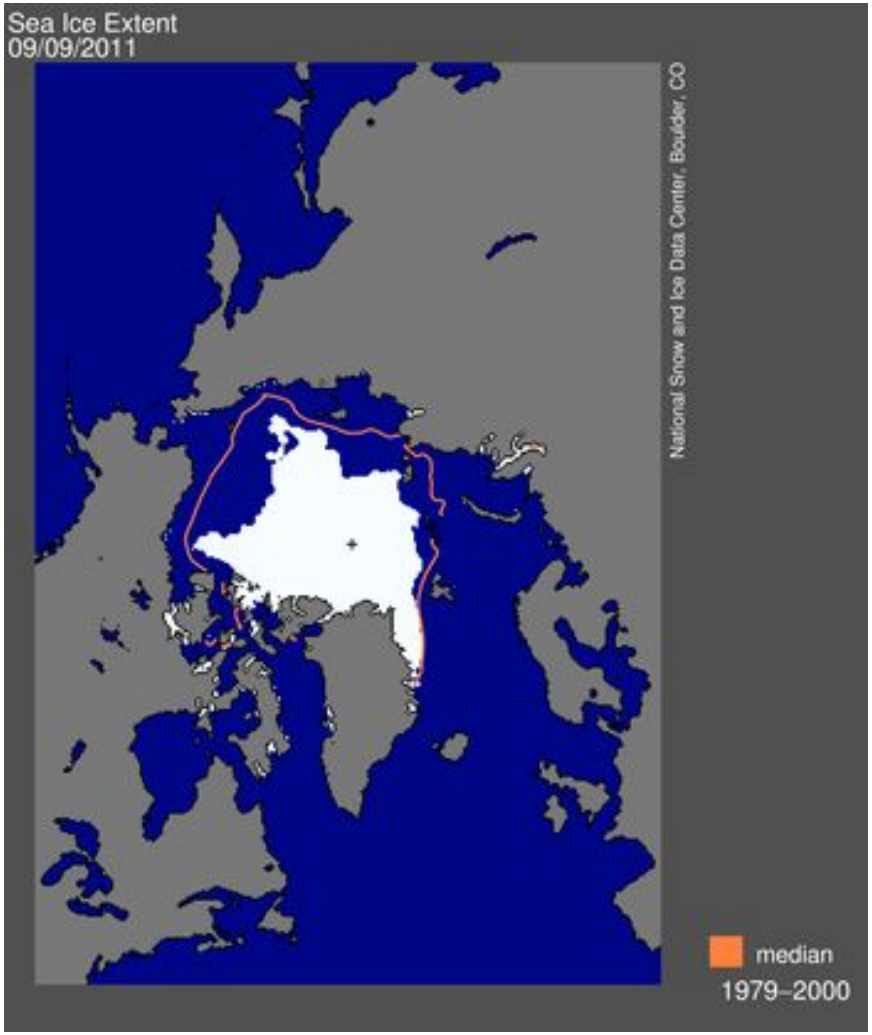
Танення льодовика МкМурдо, дані Landsat ETM 18 грудня 1999 р.

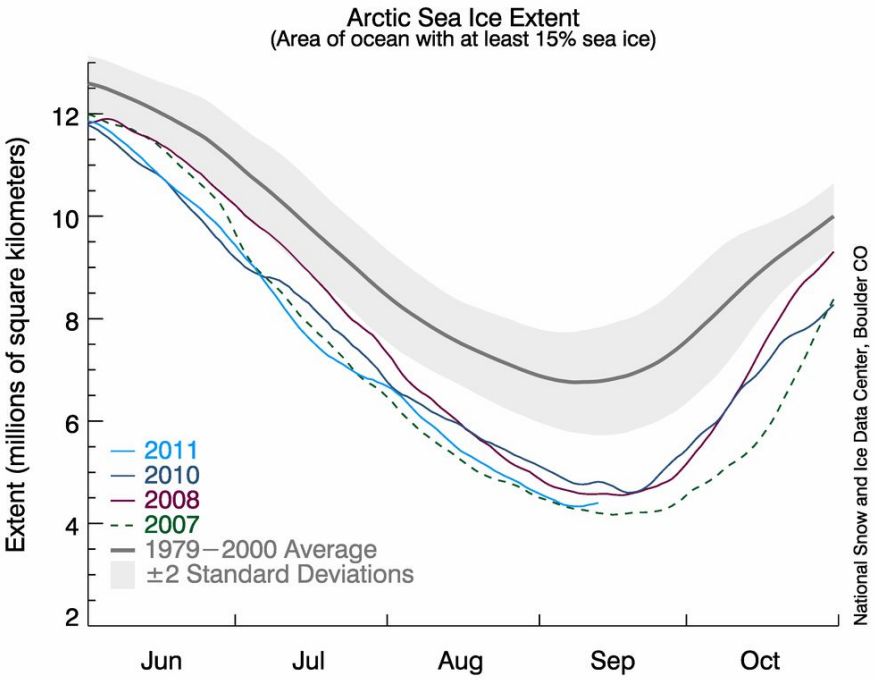
Змінення льодового покриву архіпелагу Олександра, Британська Колумбія, дані MODIS 18 лютого 2002 р.

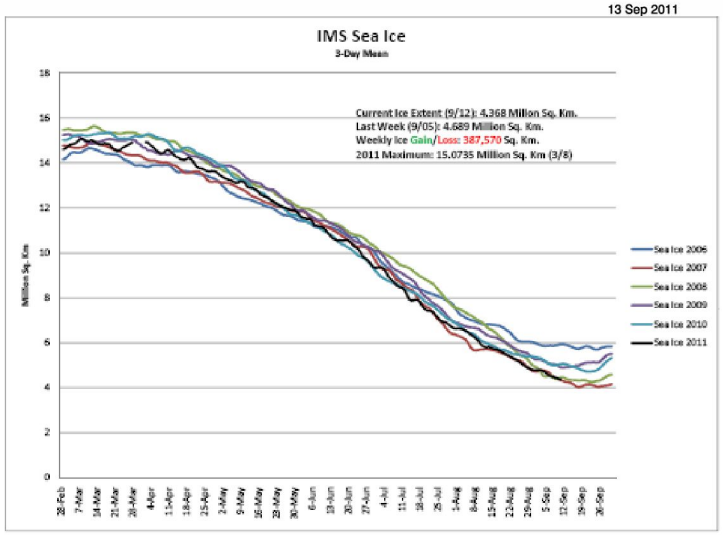
Глобальна динаміка льодового покриву



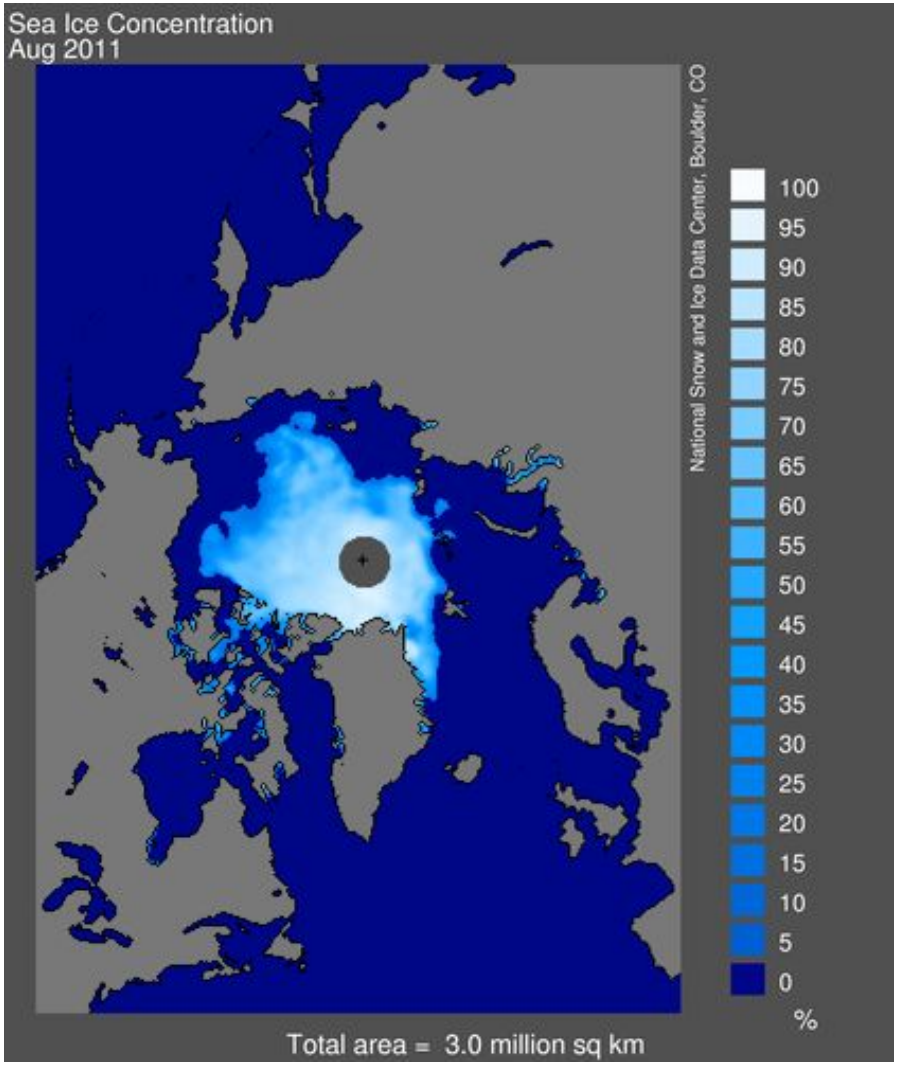
Динаміка льодового покриву: океан

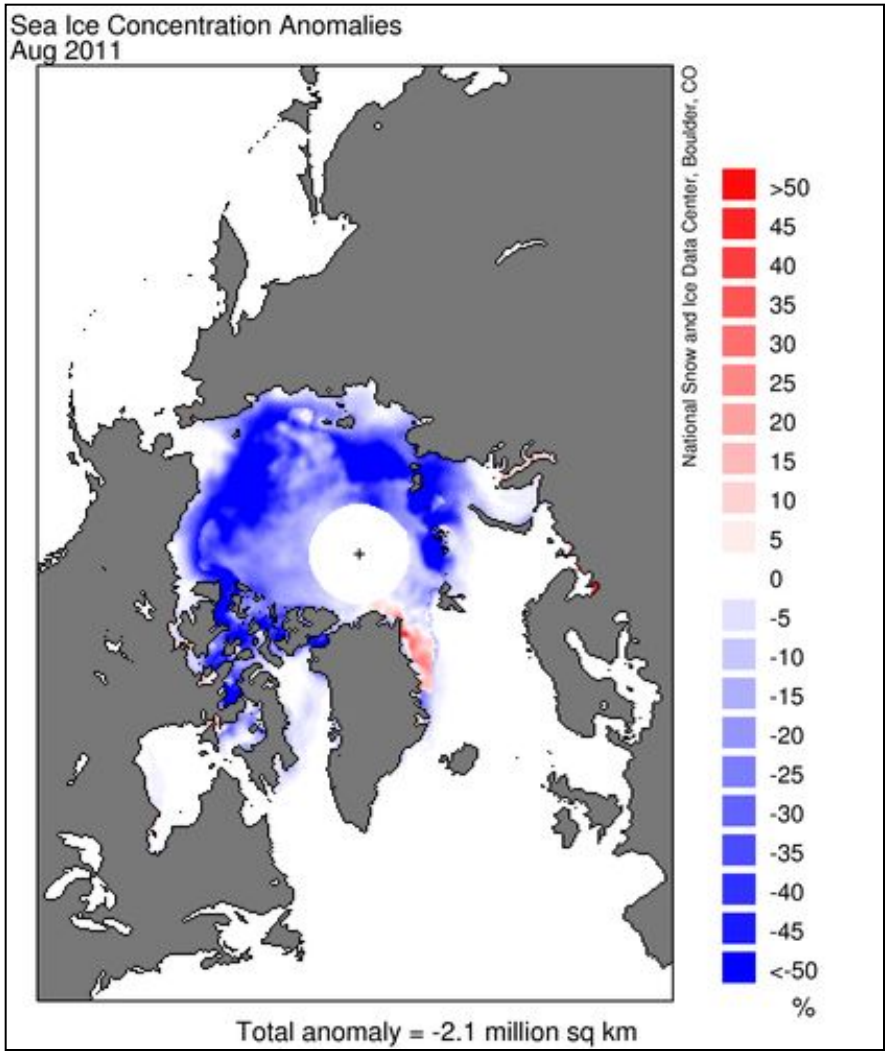




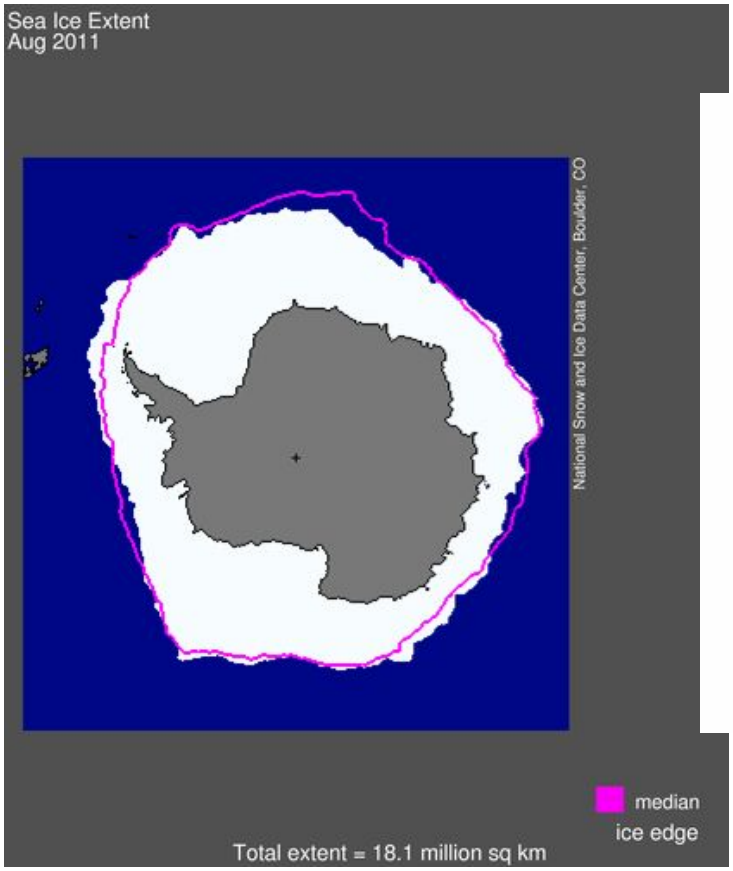


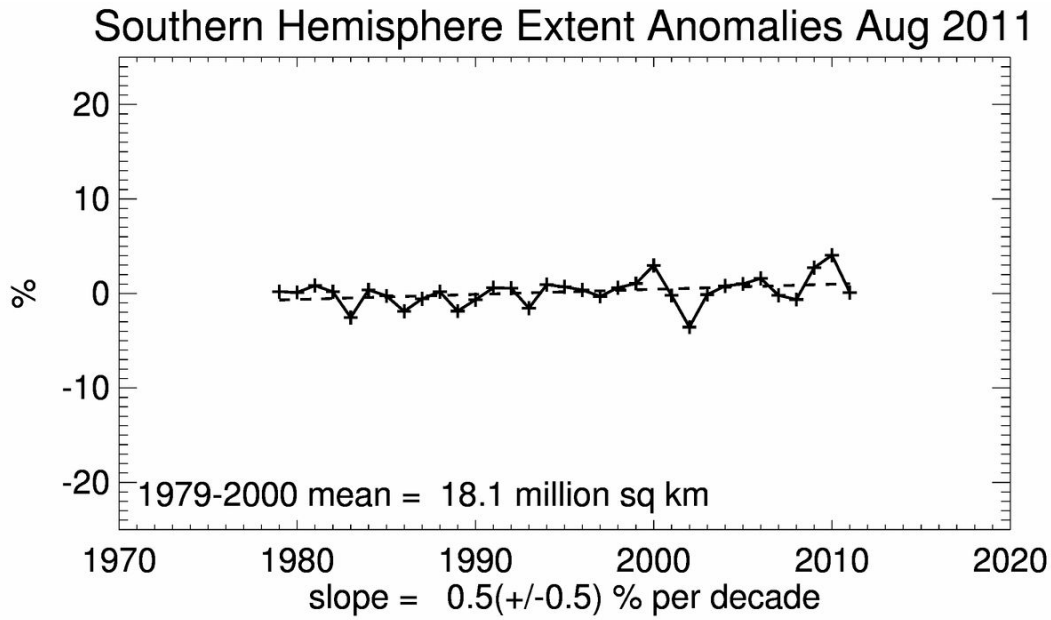
Аналіз розподілу арктичного льоду



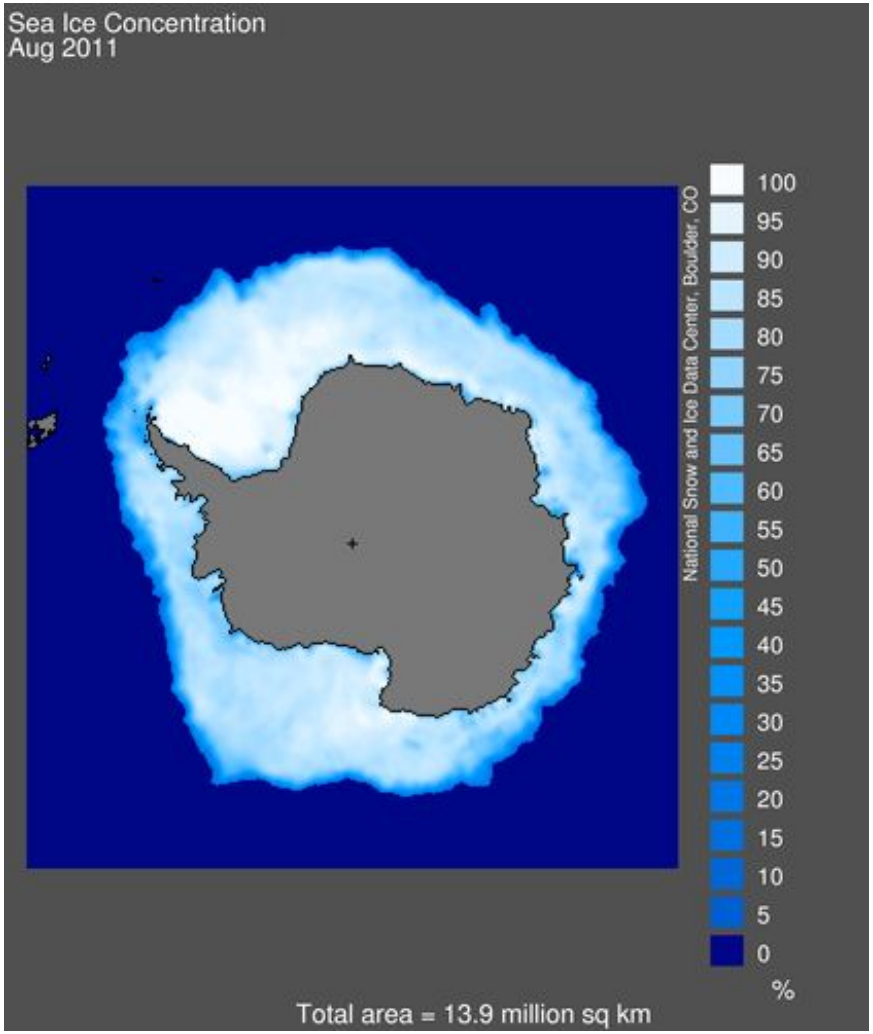


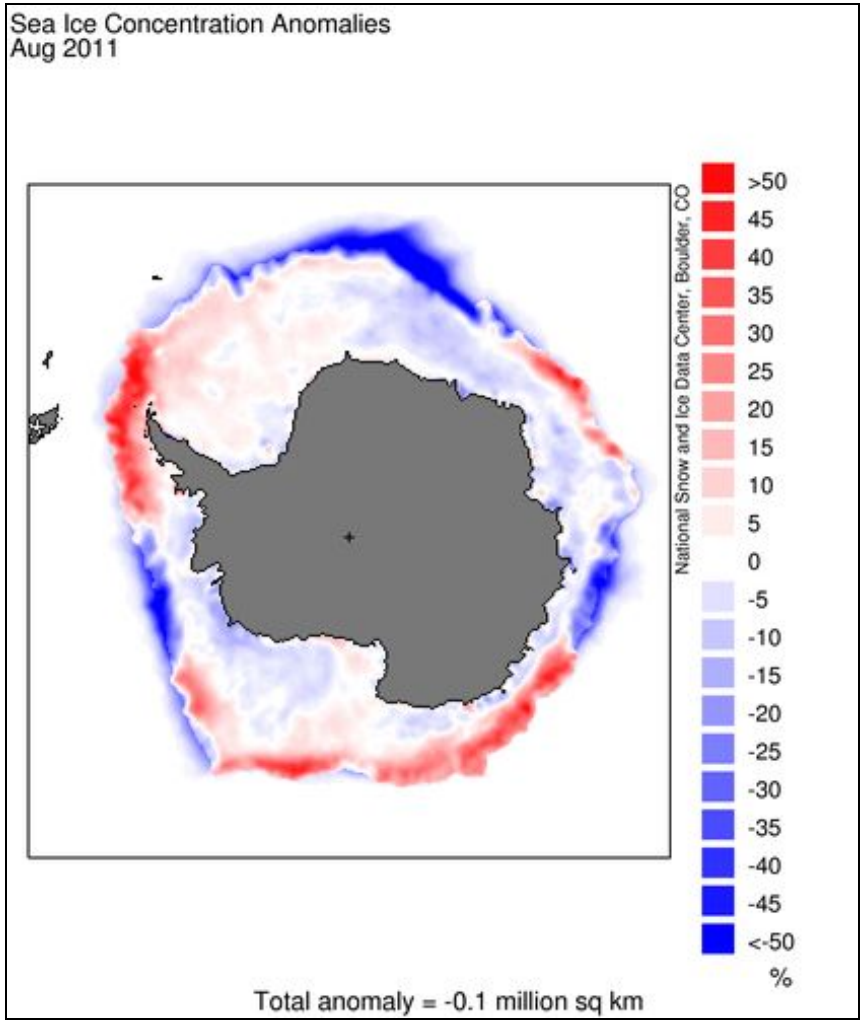
Аналіз розподілу антарктичного льоду



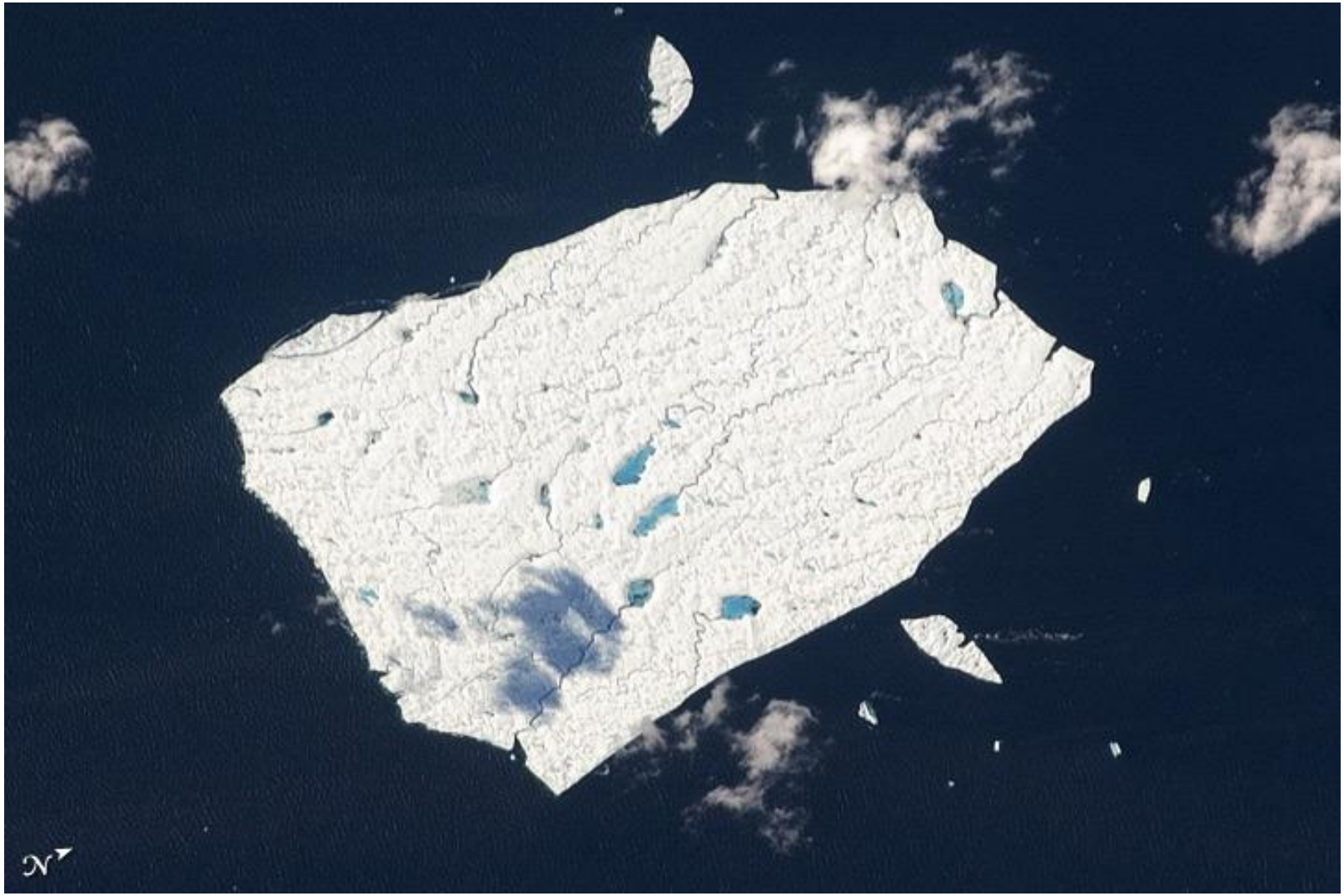


Аналіз розподілу антарктичного льоду





Реєстрація плавучого льоду



Льодовий острів (айсберг) Петерманн (3,5 х 4 км, відкол льодовика Петерманн, Гренландія) зображення ISS NASA (ISS 028-E-34749) 29 серпня 2011 р.

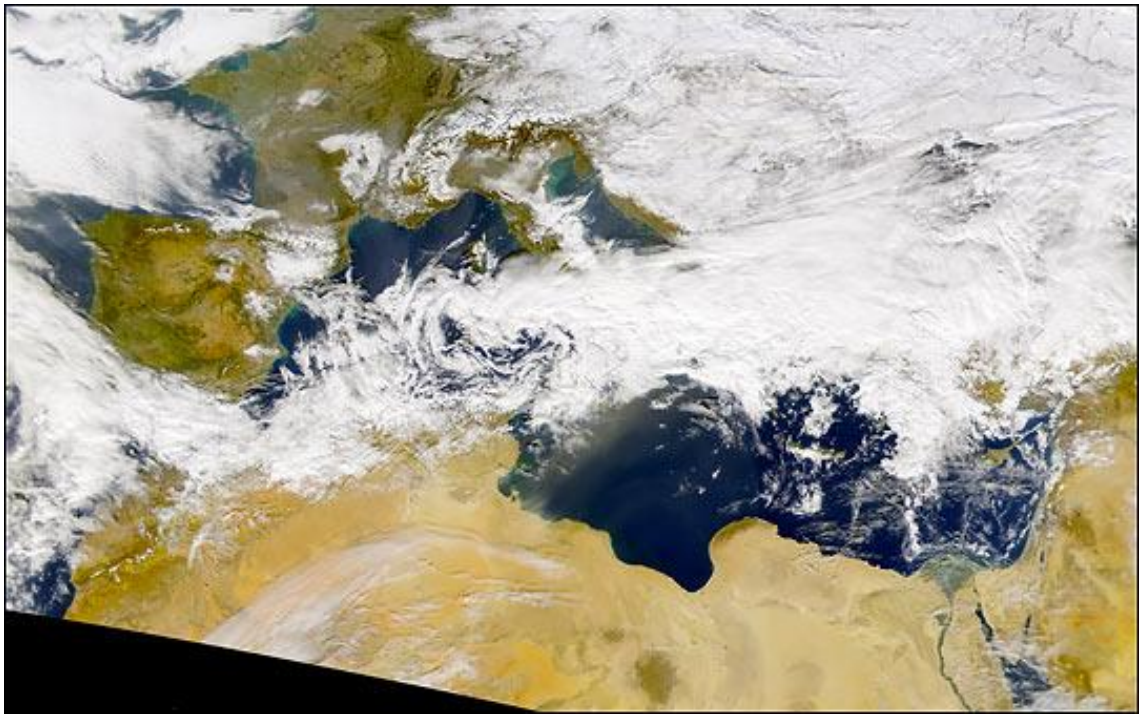
Вивчення снігового покриву

Normalized Difference Snow Index (NDSI)

$$NDSI = \frac{R_v - R_{n-i}}{R_v + R_{n-i}}$$

$$\mathrm{NDSI} \geq 0.4$$

де Rv і Rn-i – відбиття у видимому (600нм) і ближньому інфрачервоному (800нм) діапазонах

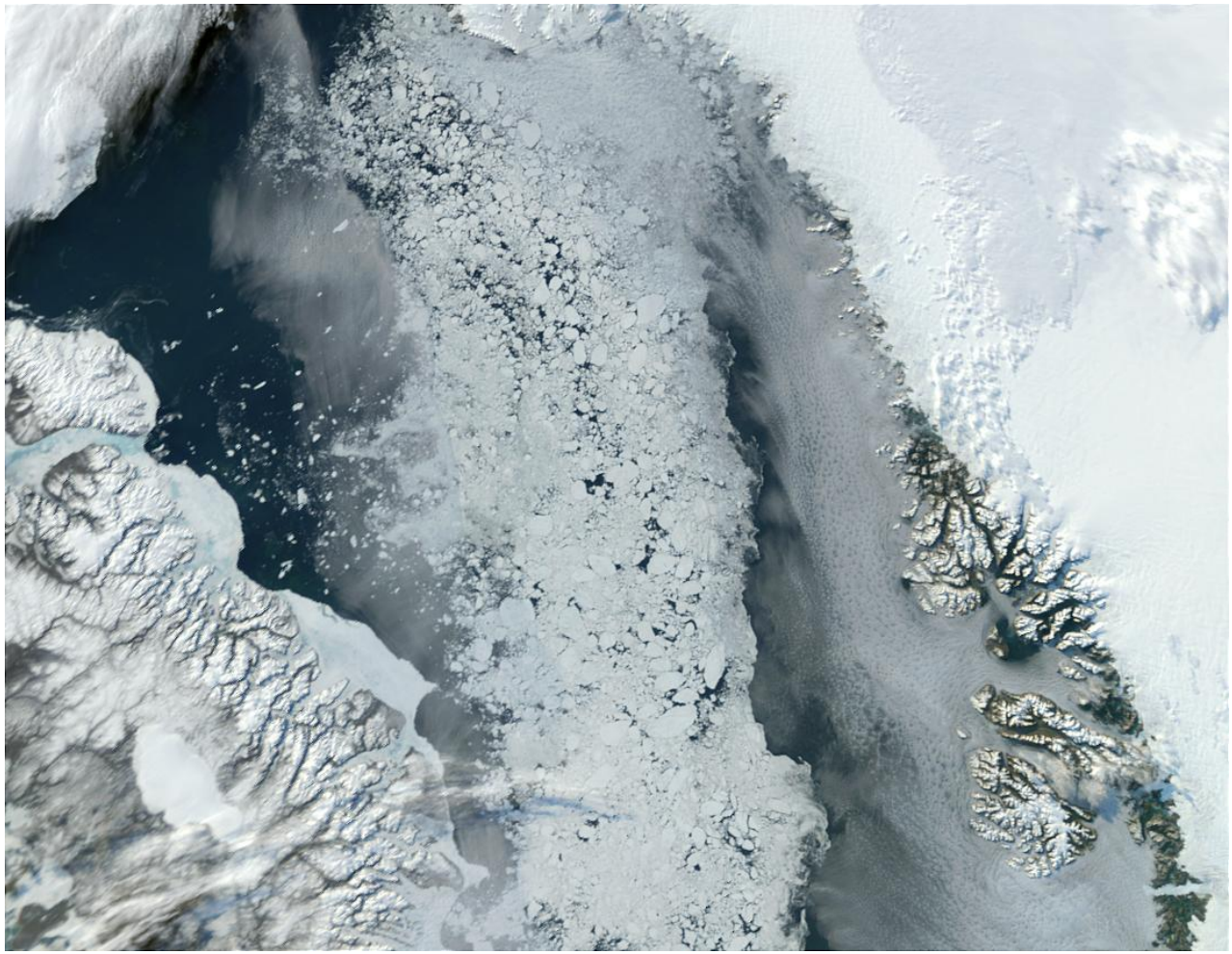


Розподіл снігового покриву та снігопадів в Європі (дані SeaWiFS, 16 грудня 2001 р.)

Вивчення регіонального розподілу снігового покриву

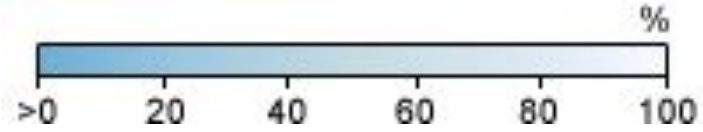
Розподіл снігового покриву в Північній Америці (дані MODIS, 02 лютого 2002 р.)

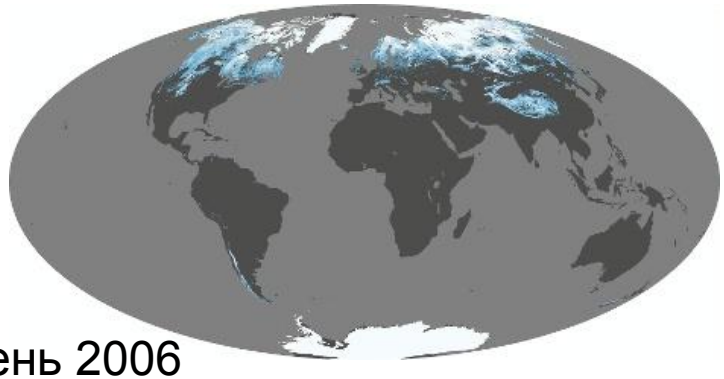
Локальна динаміка снігового покриву



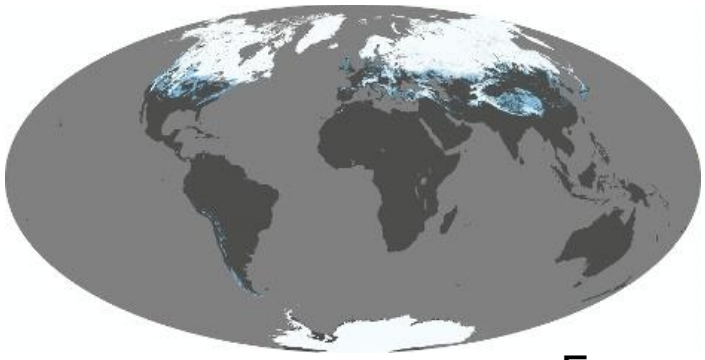
Танення снігового покриву Гренландії та льодового покриву о. Баффіна (дані MODIS, 07 березня 2001 р.)

Глобальна динаміка снігового покриву (дані спостережень MODIS 2000 - 2011)

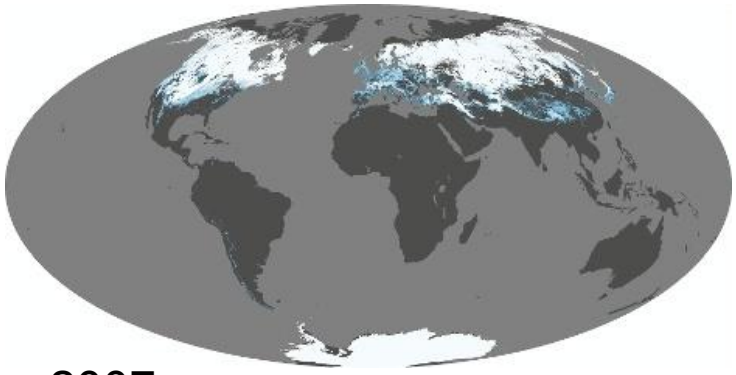




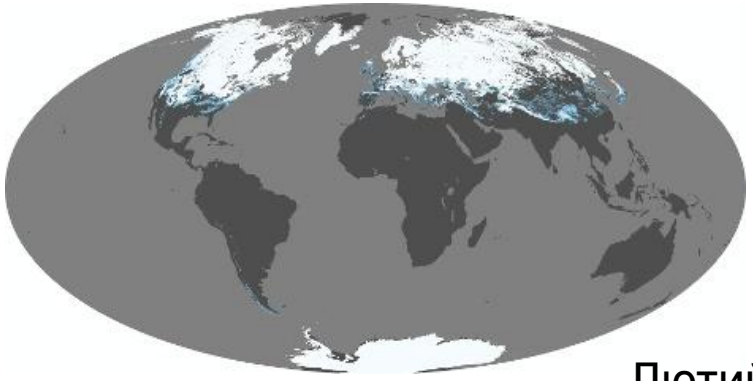
Жовтень 2006



Березень 2009

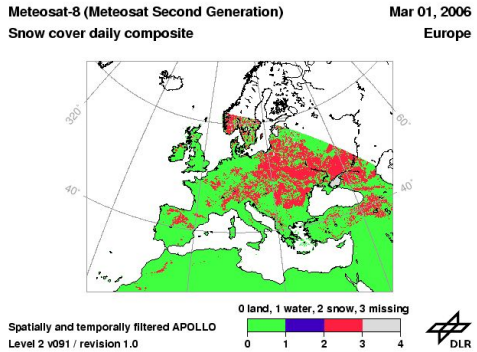


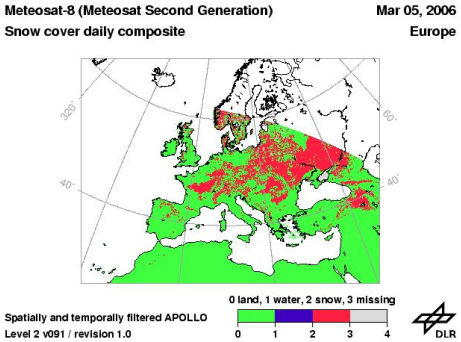
Січень 2007

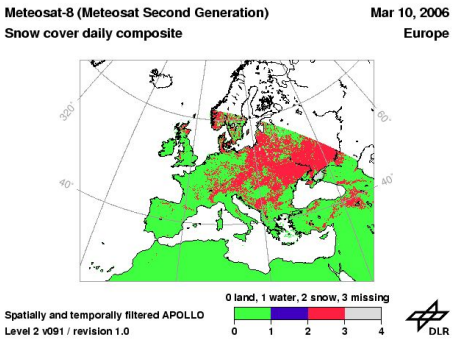


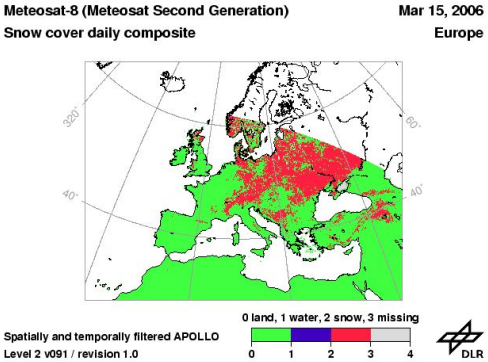
Лютий 2010

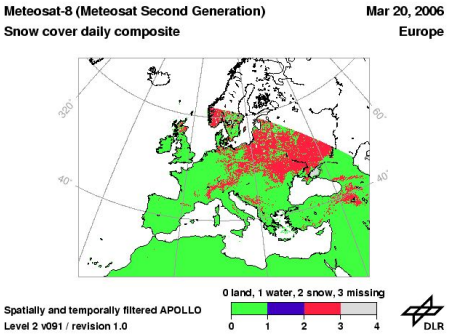
Розподіл снігового покриву за даними супутникових спостережень в оптичному діапазоні (Європа, березень 2006)

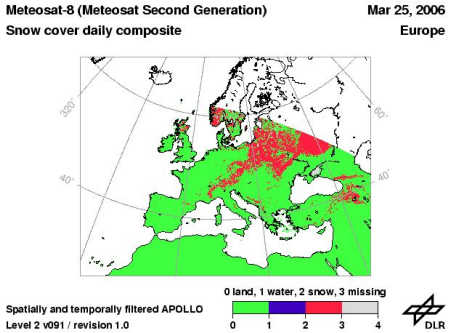










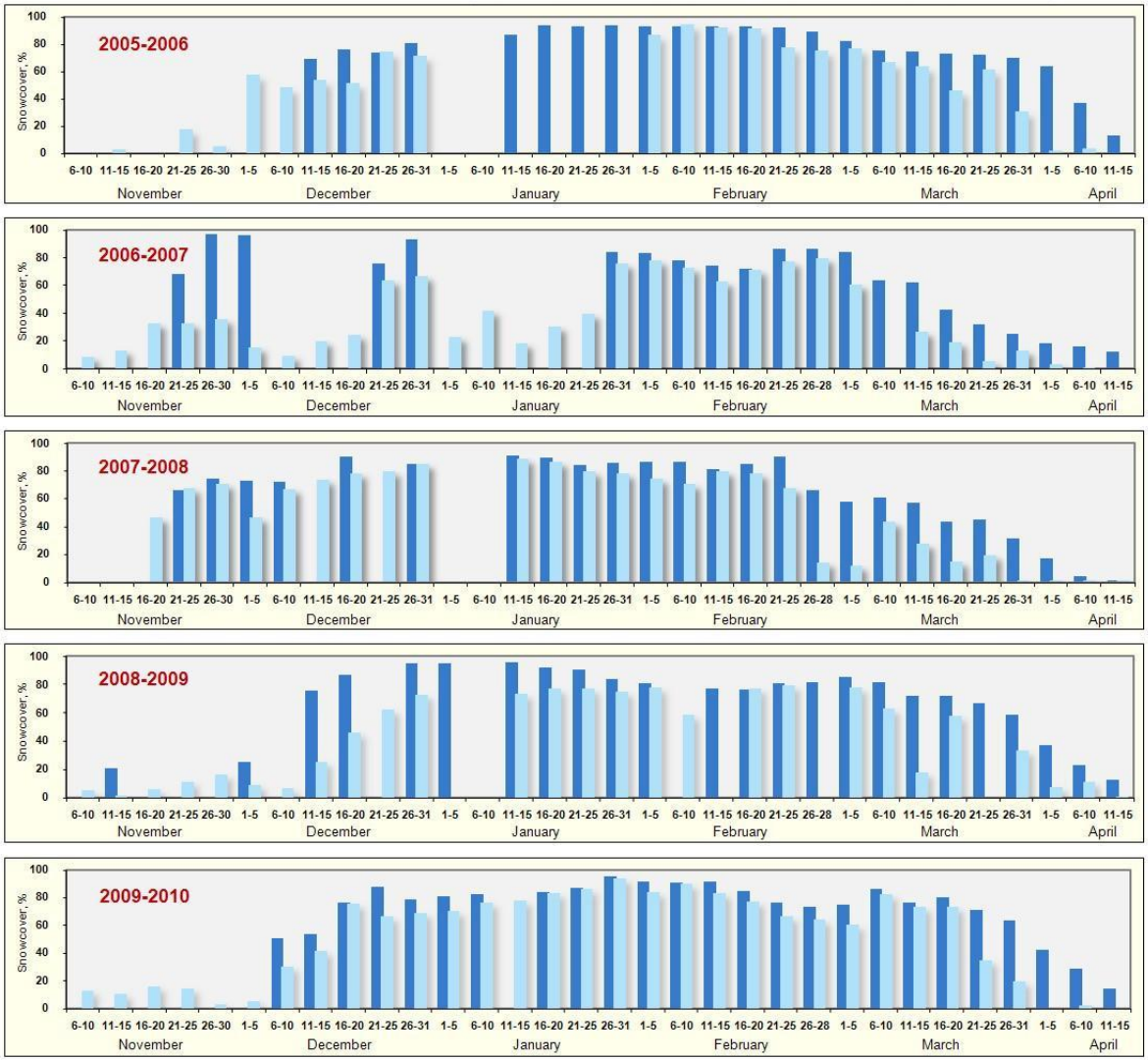


Динаміка снігового покриву

Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring
State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta"

SNOW COVER MONITORING OF EUROPEAN RUSSIA

(NOAA/AVHRR, NOAA/AMSU-A, 2005 - 2010)

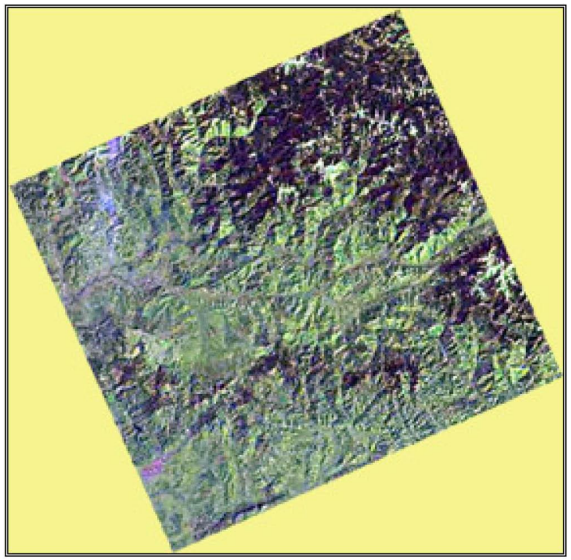


- continuous snow cover (NOAA/AVHRR)
- dry snow cover (NOAA/AMSU-A)

		2005 - 2006		2006 - 2007		2007- 2008		2008 - 2009		2009 - 2010	
		continuous	dry	continuous	dry	continuous	dry	continuous	dry	continuous	dry
November	6-10		0		9				5		13
	11-15		2		13			21	2		11
	16-20				33		47		6		16
	21-25		17	69	32	66	68		11		14
	26-30		4	97	36	75	71		16		3
December	1-5		57	97	16	73	46	25	9		5
	6-10		48		9	72	67		7	50	30
	11-15	69*	53		20		73	75	25	54	41
	16-20	76	51		24	91	78	87	46	76	76
	21-25	74	74	76	64		80	91.5	62	88	67
	26-31	81	71	94	67	85	85	95	73	78	69
January	1-5				23			95		81	70
	6-10				42					82	77
	11-15	87			18	91	89	96	74		78
	16-20	94			31	89	86	92	78	84	83
	21-25	93			39	84	80	91	77	87	86
	26-31	94		84	76	86	78	84	75	95	94
February	1-5	93	86	83	78	87	74	81	78	91	84
	6-10	93	94	78	73	86	70	83.01	59	91	90
	11-15	93	91	74	63	81	79	77		92	83
	16-20	93	91	72	71	85	79	76	77	84	77
	21-25	92	77	87	77	90	68	81	79	77	66
	26-28	89	74	86	79	66	14	82		73	64
March	1-5	82	77	85	61	58	12	85	78	74	61
	6-10	76	66	64		61	43	82	63	86	82
	11-15	75	63	62	26	57	28	72	18	76	74
	16-20	73	46	42	19	43	15	72	58	80	73
	21-25	72	60	32	5	45	19	67		71	35
	26-31	70	30	25	13	32	1	59	33	63	19
April	1-5	64	1	18	3	17	1	37	7	42	
	6-10	37	3	16	1	4	1	23	11	28	2
	11-15	13	0	12	0	1	1	13	1	14	0

* - *Snow cover, %*

Приклад оцінки динаміки снігових запасів за даними супутникових спостережень в оптичному діапазоні (басейн р. Тиса)

А. Фрагмент обробленого знімка	В. Розподіл товщини снігового покрову по площі космічного зображення
	

Умовні позначення:

території, що не вкриті снігом

ділянки, частково вкриті снігом

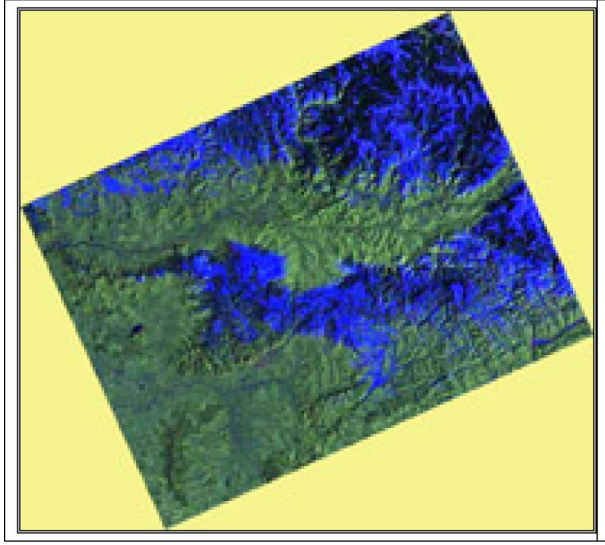
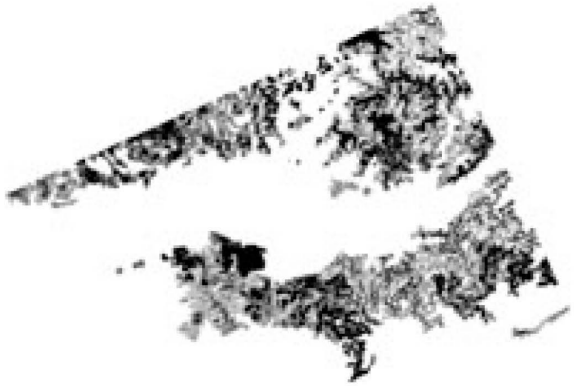
товщина снігового покрову до 2см

товщина снігового покрову 4 - 6см

товщина снігового покрову від 10см

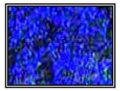
Розподіл снігового покрову по досліджуваної території станом на 28 жовтня 2001 року за даними супутника Landsat-7 TM

Приклад оцінки динаміки снігових запасів за даними супутникових спостережень в оптичному діапазоні (басейн р. Тиса)

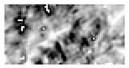
А. Фрагмент обробленого знімка	В. Розподіл товщини снігового покрову по площі космічного зображення
	

Умовні позначення:

території, що не вкриті снігом

 ділянки, вкриті снігом

товщина снігового покрову до 2см

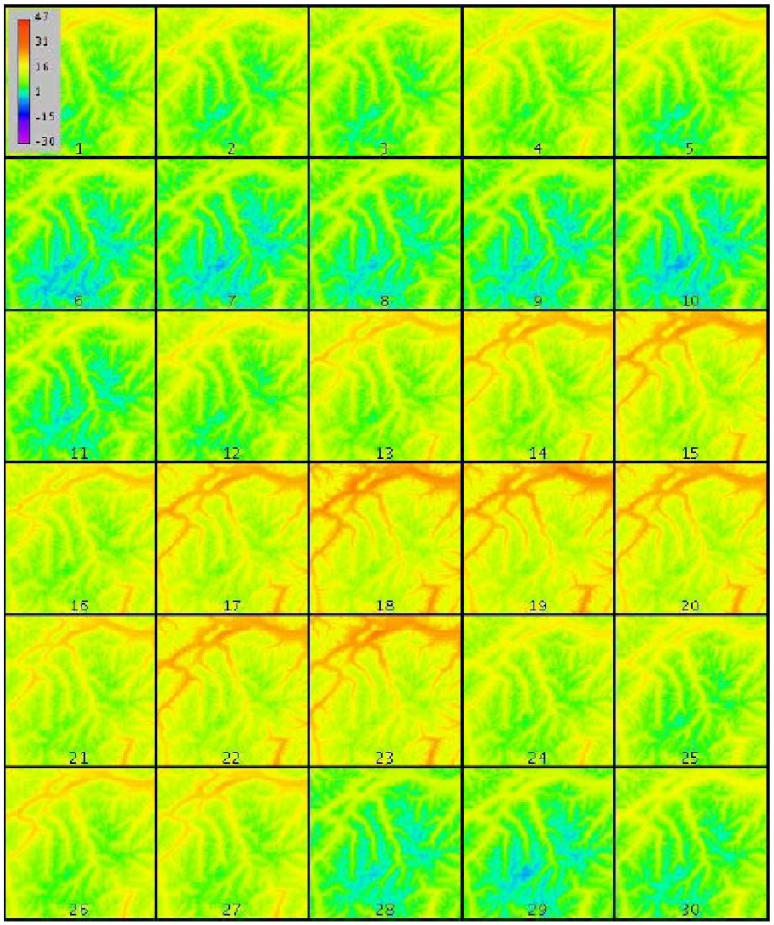
 товщина снігового покрову 4 - 6см

товщина снігового покрову від 10см

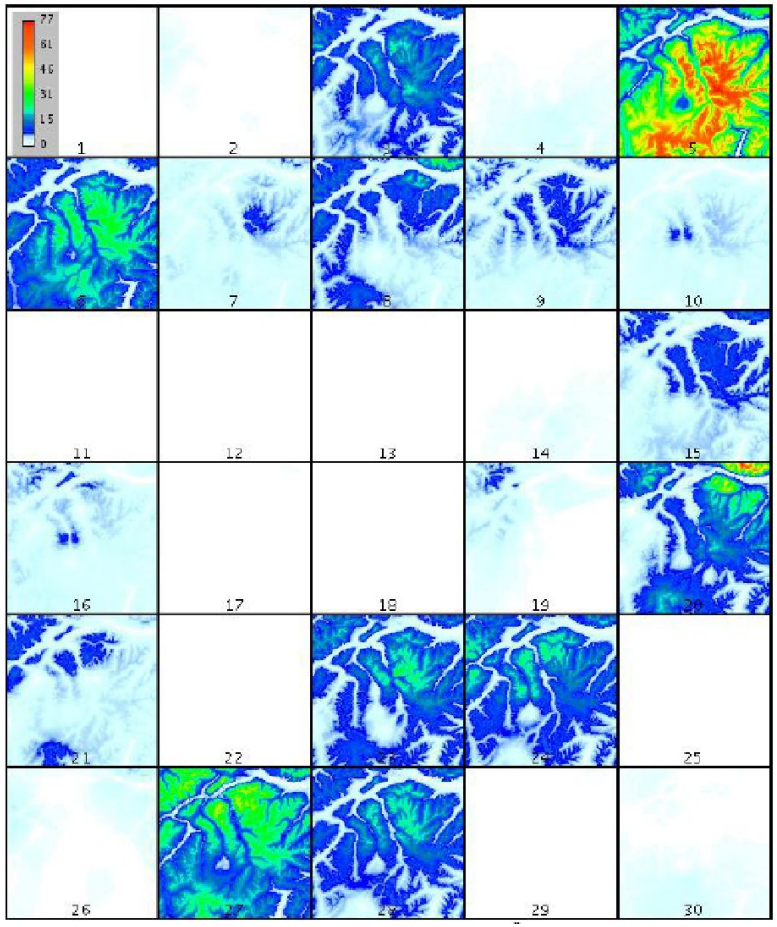
Розподіл снігового покрову по досліджуваної території станом на 17 лютого 2002 року за даними супутника Landsat-7 TM

Аналіз даних супутникового спостереження

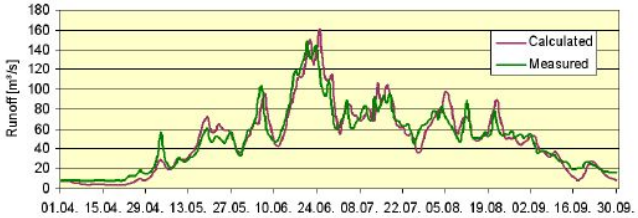
Розподіл середньодобових температур повітря по регіону

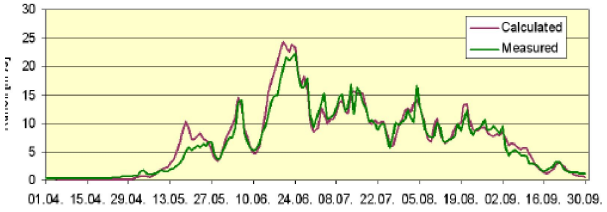


Розподіл середньодобових опадів по регіону

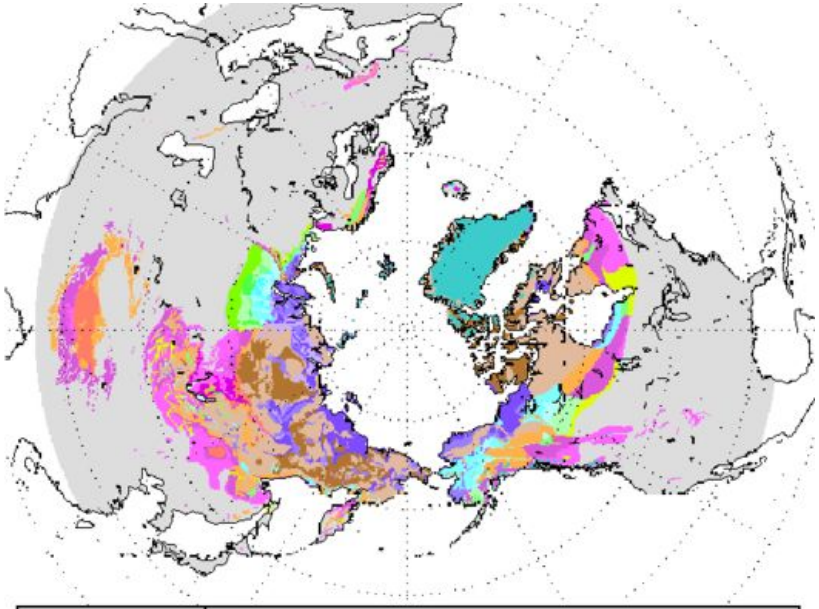


Розподіл середньодобових (розрахованих та виміряних) значень стоку (м/сек) по регіону досліджень





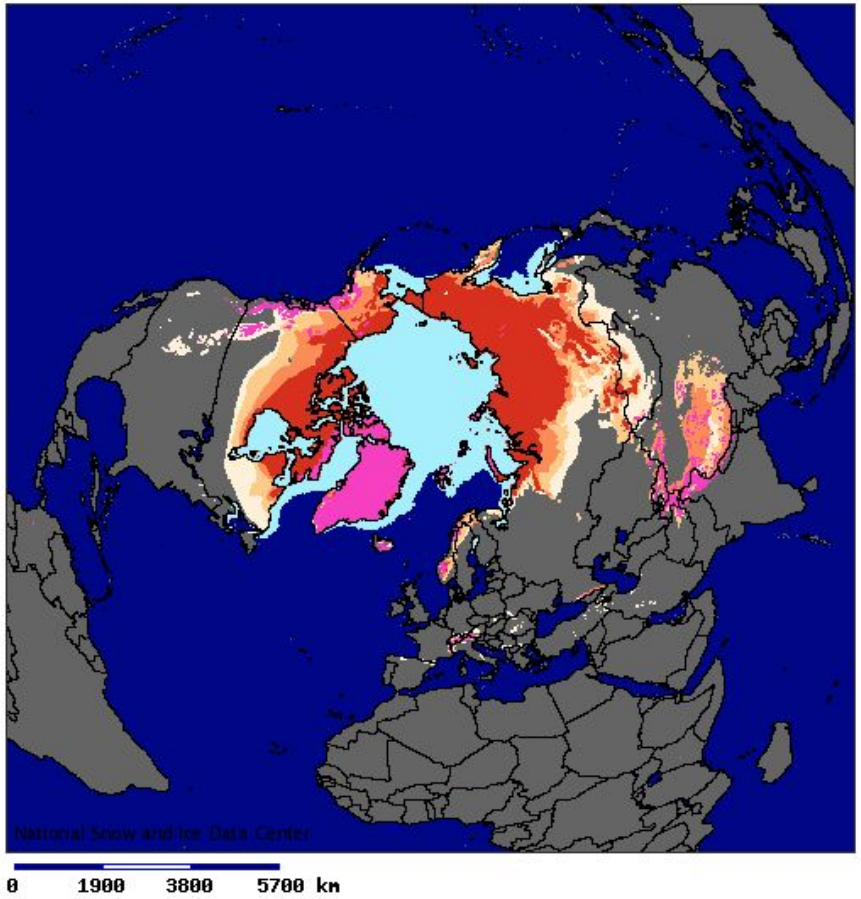
Вивчення вічної мерзлоти



Permafrost Extent (percent of area)	Ground Ice Content (visible ice in the upper 10-20 m of the ground; percent by volume				
	Lowlands, highlands, and intra-and intermontane depressions characterized by thick overburden cover (>5-10m)			Mountains, highlands, ridges, and plateaus characterized by thin overburden cover (<5-10 m) and exposed bedrock)	
	High (> 20%)	Medium (10-20%)	Low (0-10%)	High to medium (>10%)	Low (0-10%)
Continuous (90-100%)					
Discontinuous (50-90%)					
Sporadic (10-50%)					
Isolated Patches (0-10%)					

Ice caps and glaciers

Розподіл та типологія вічної мерзлоти в Північній півкулі (за даними географічних, геофізичних, геологічних досліджень та супутникових спостережень 1975 – 2010)



Порівняльний розподіл та типологія мерзлотних явищ в Північній півкулі (за даними географічних, геофізичних, геологічних досліджень та супутникових спостережень 1975 – 2010)

Showing Outside Walls of Knickerbocker Theater.