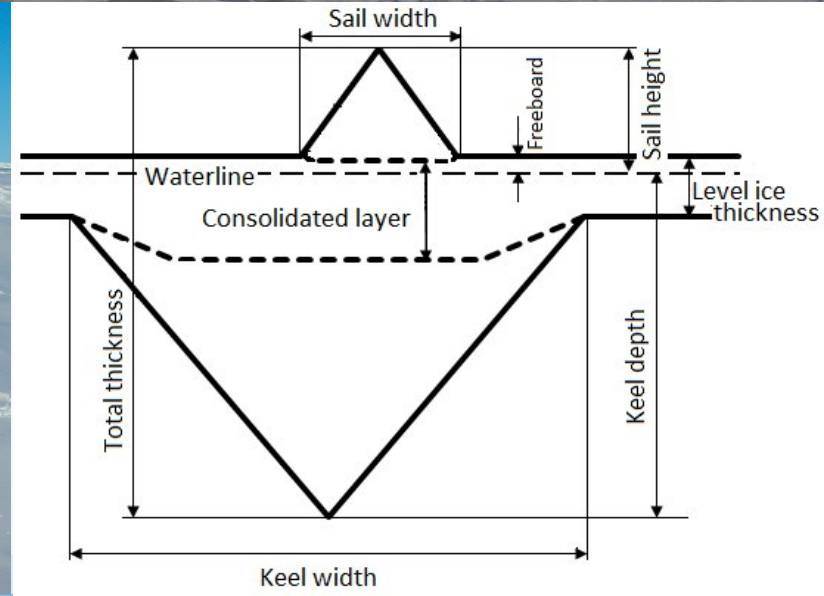


# Исследования торосов на дрейфующей станции «Северный Полюс - 41» в течение годового цикла

*Р.Б. Гузенко, Ю.Г. Гаврилов, С.В. Хотченков*



*Торос: холмообразное нагромождение битого льда, образовавшегося в результате сжатия (WMO Sea Ice Nomenclature)*



## Различные оценки вклада и тенденций изменения доли торосистого льда за последние десятилетия в ледяном покрове Арктики



- Торосистый лед составляет 40 % от общего объема льда в Северном Ледовитом океане (Hansen et al., 2014)
- После 2007 года доля толстого и деформированного льда сократилась вдвое (Sumata et al., 2023)
- Отрицательные тенденции плотности и высоты торосов при увеличении частоты торосообразований за период 1993-2023 гг. (Krumpfen et al., 2025)
- Доля торосистого льда к концу зимы достигает 26% (Itkin et al., 2018).

# Зачем нужно исследовать торосы?

- Параметры торосов необходимо учитывать в моделях динамики и термодинамики ледяного покрова, а также в климатических моделях для корректной оценки теплообмена между океаном и атмосферой через ледяной покров
- Для определения биомассы населяющих лед организмов в биологии (киль торосов является убежищем для одних живых организмов и кормовой базой для других)



- Торосы являются опасными ледяными образованиями для объектов шельфовой инфраструктуры и судоходства. Для проектирования любых объектов, эксплуатация которых планируется в замерзающих морях, необходим учет характеристик торосов конкретного региона. Толщина и прочность консолидированного слоя тороса — ключевые характеристики для расчета ледовых нагрузок

**Консолидированный слой** – слой, в котором все ледяные фрагменты сморожены в монолит

**Пористость** – относительное содержание пустот в теле тороса

# Белые пятна в исследовании торосов

- Эволюция параметров морфометрии и внутренней структуры торосов в течение годового цикла (или в течение жизни тороса по данным многомесячных наблюдений)

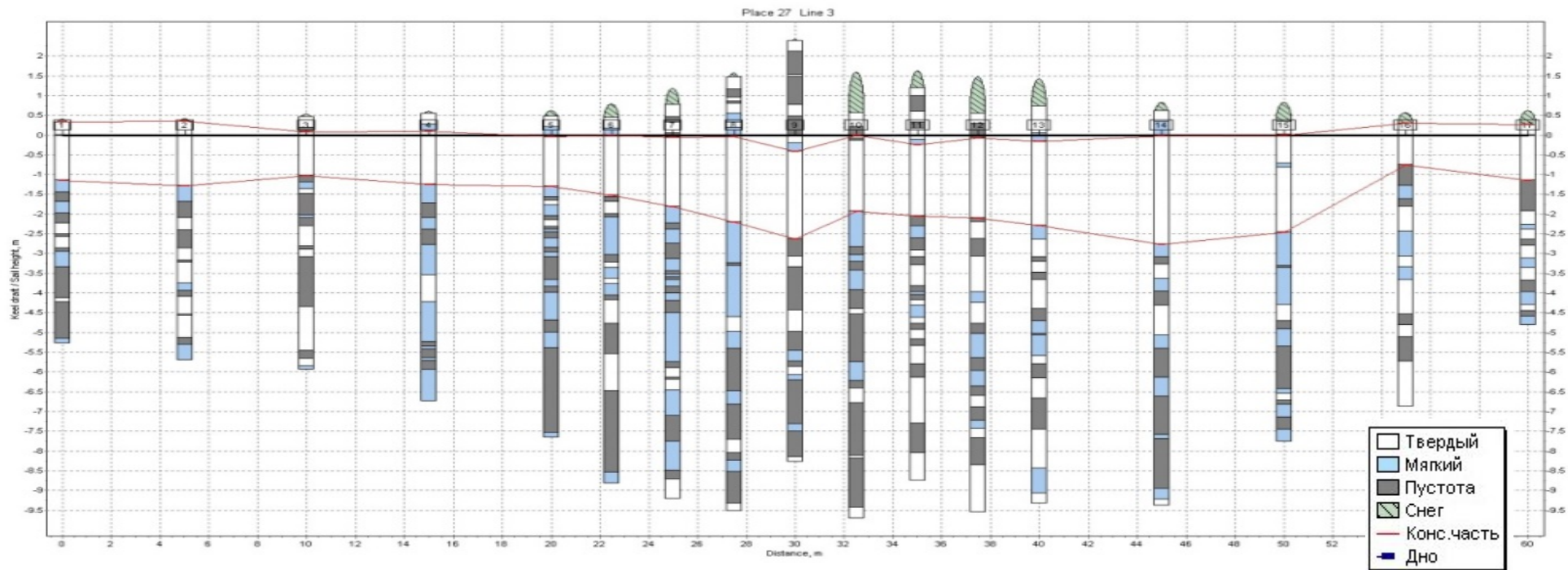
*5 месяцев (апрель-август) в Арктическом бассейне на «СП-33» (Харитонов и др., 2007)*

*6 месяцев (декабрь-май) в Хатангском заливе моря Лаптевых (Bekker et al., 2022)*

*7 месяцев (январь-июль) в Арктическом бассейне в MOSAiC (Salganik et al., 2023)*

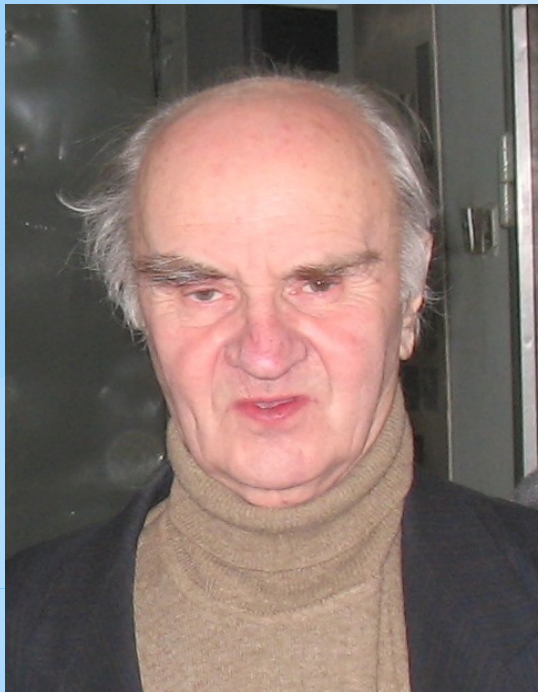
- Оценка вклада атмосферного выхолаживания в зимний период и таяния в летний период в процесс консолидации тороса (изменения толщины консолидированного слоя)
- Исследование внутреннего строения старых (двухлетних и многолетних) торосов, а также торосов, образованных из старого льда
- Оценка воздействия различных факторов (температуры воздуха, начальной пористости тороса, толщины и возраста льда, образующего торос, толщины ледяных блоков паруса, размеров паруса и киля тороса, толщины снега на торосе) на эволюцию консолидированного слоя тороса

# Методы изучения внутренней структуры ледяных образований



- Механическое (шнековое) бурение
- Водяное термобурение без автоматической регистрации параметров бурения
- При помощи термокос
- Термобурение с регистрацией параметров бурения на электронный носитель

# Технология термобурения с записью параметров бурения на электронный носитель

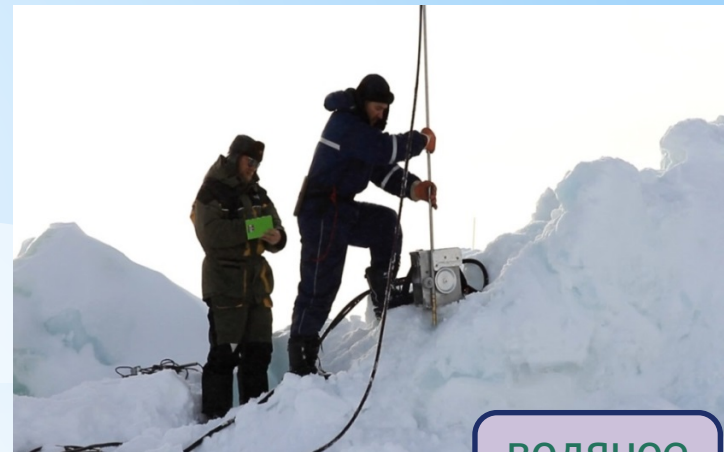


Валентин Андреевич  
Морев

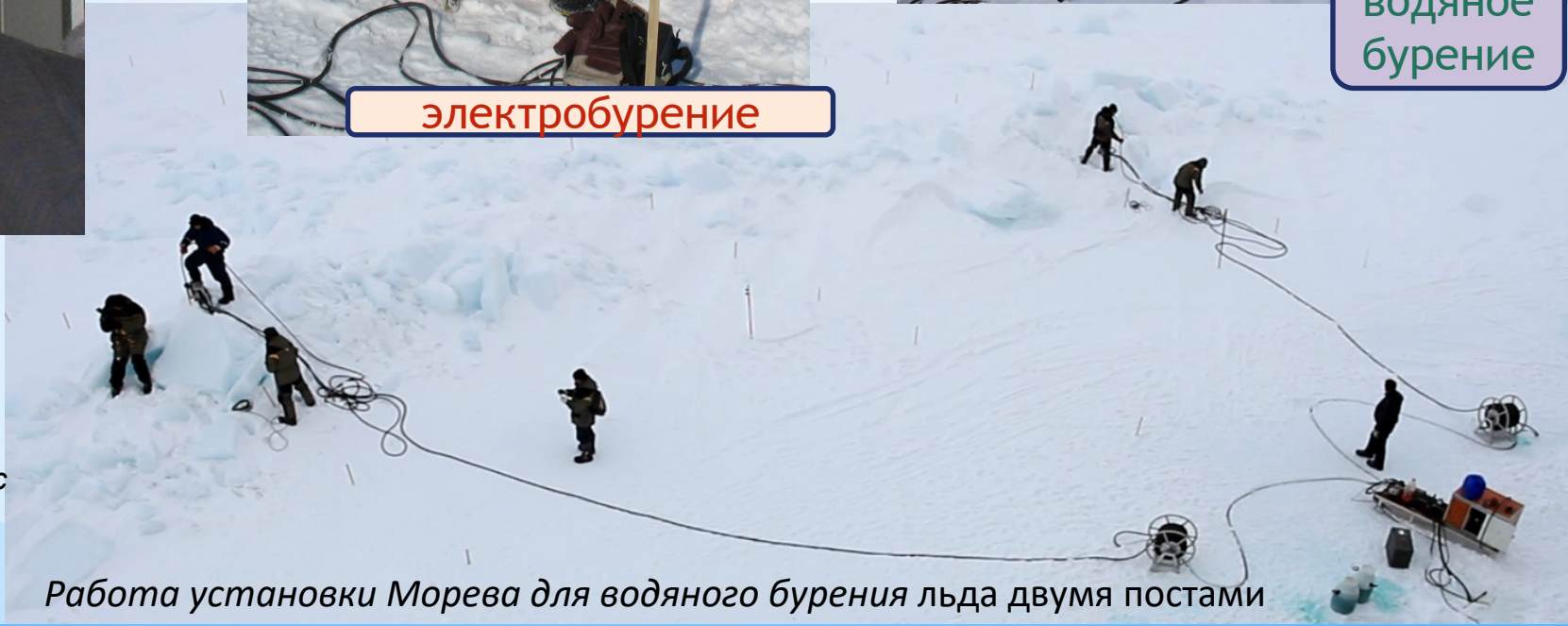
Изобретатель,  
конструктор, создатель  
технологии термобурения с  
автоматической  
регистрацией параметров  
бурения



электробурение



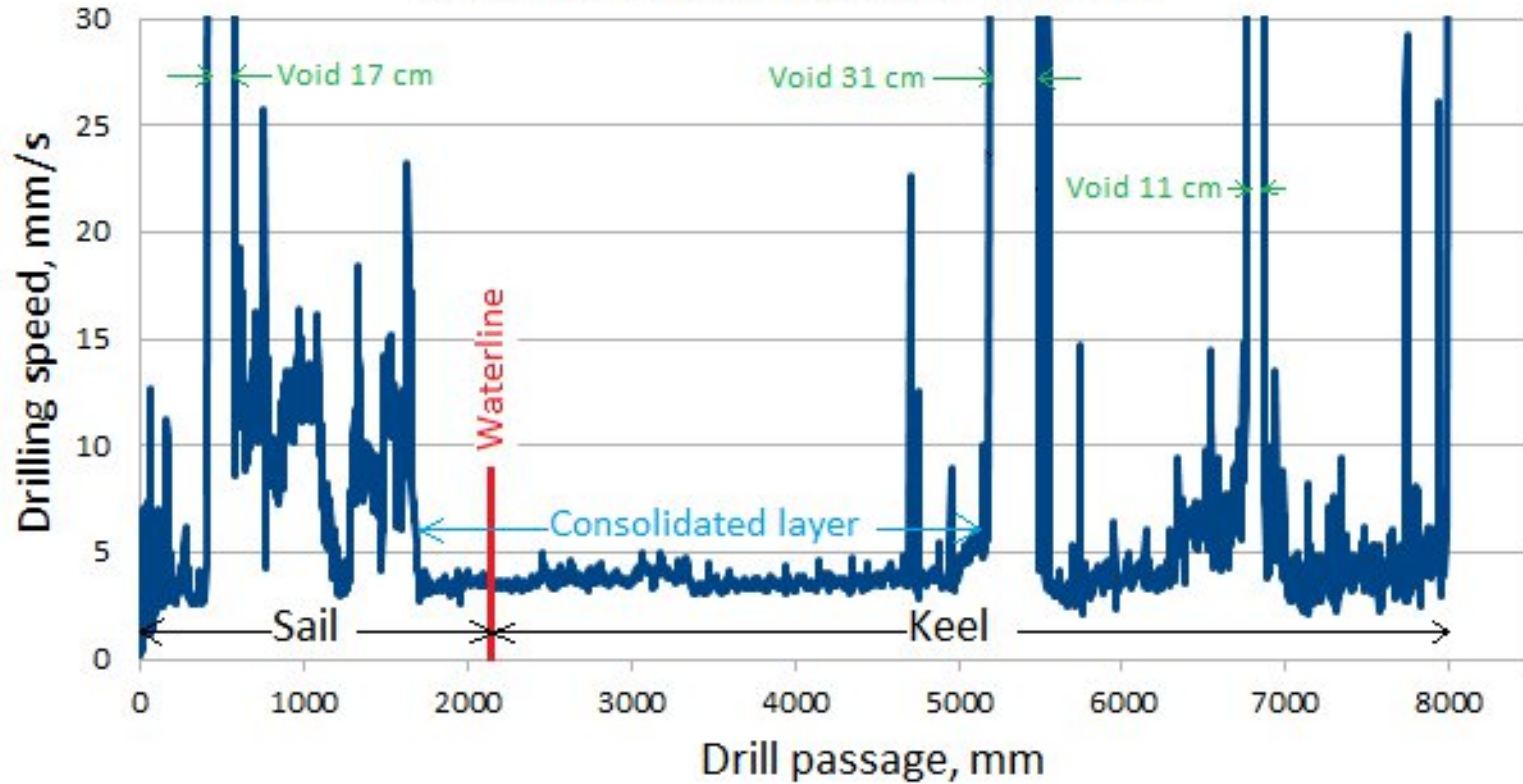
водяное  
бурение



Работа установки Морева для водяного бурения льда двумя постами

# Анализ скорости бурения в скважине

## Profile 2, point 9 (May 04, 2023)



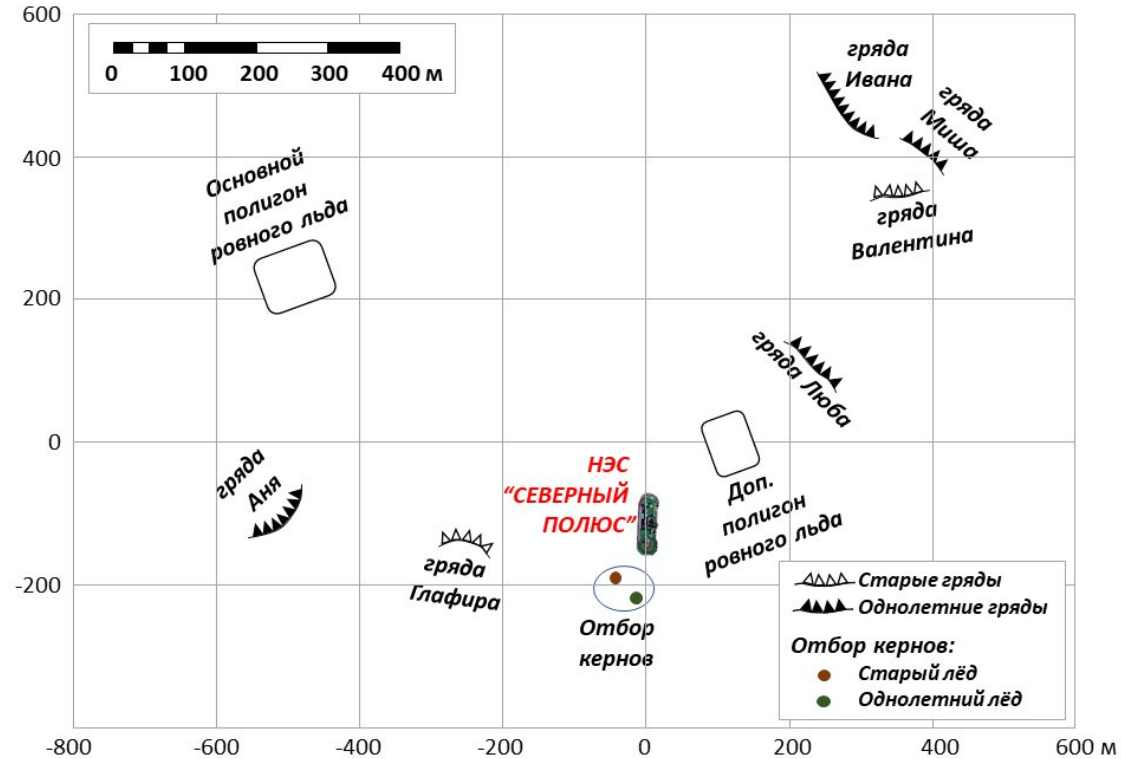
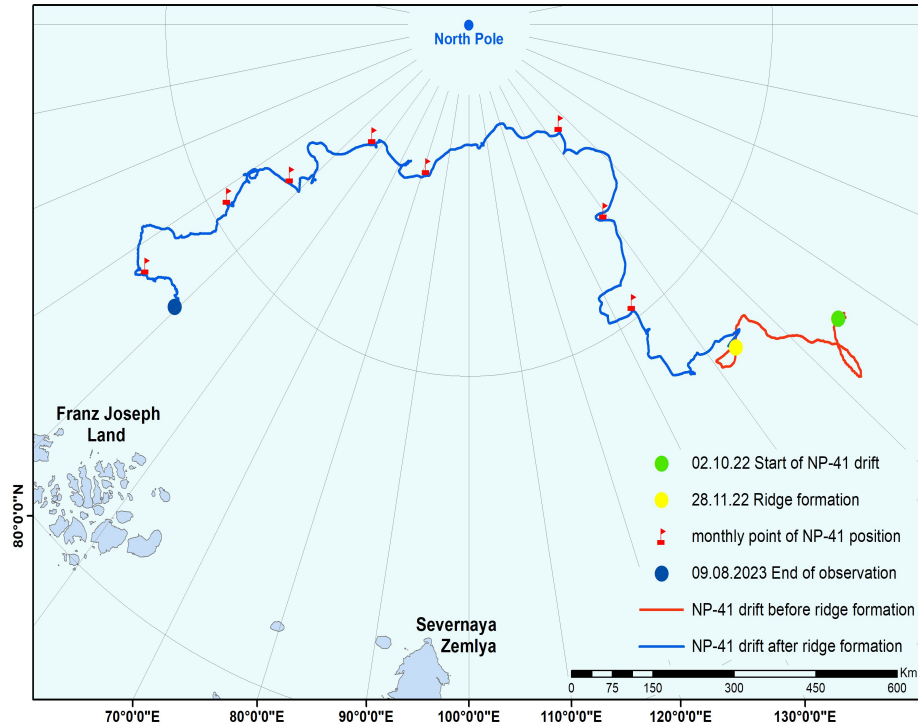
Sail 214 cm, Keel 584 cm, Total thickness 798 cm  
Consolidated layer thickness 348 cm (+43, -305)

**Цель исследований:** определить закономерности консолидации (промерзания) тороса и оценить влияние различных факторов на этот процесс в течение годового цикла.

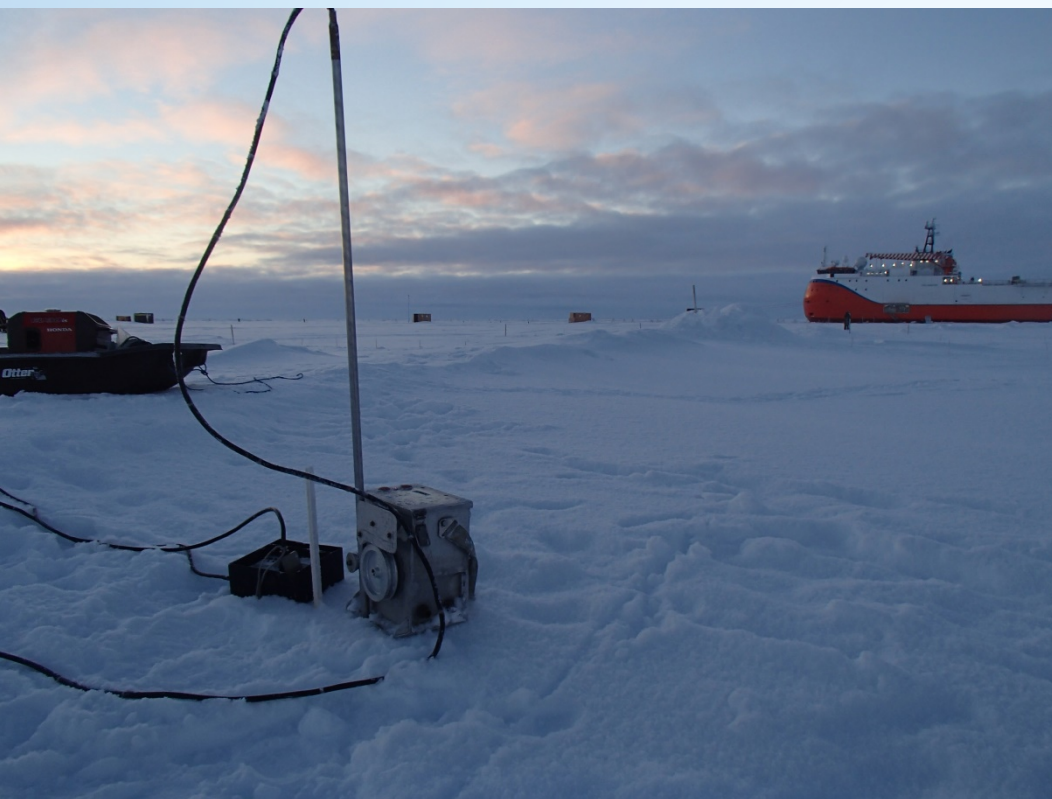


*Целесообразно исследовать несколько торосов различных размеров и возраста (однолетние, старые, свежие) комплексом методов – электробурением и с помощью термокос.*

# Траектория дрейфа станции «Северный Полюс - 41» (октябрь 2022 – август 2023) и схема расположения на ней исследованных гряд торосов и полигонов ровного льда

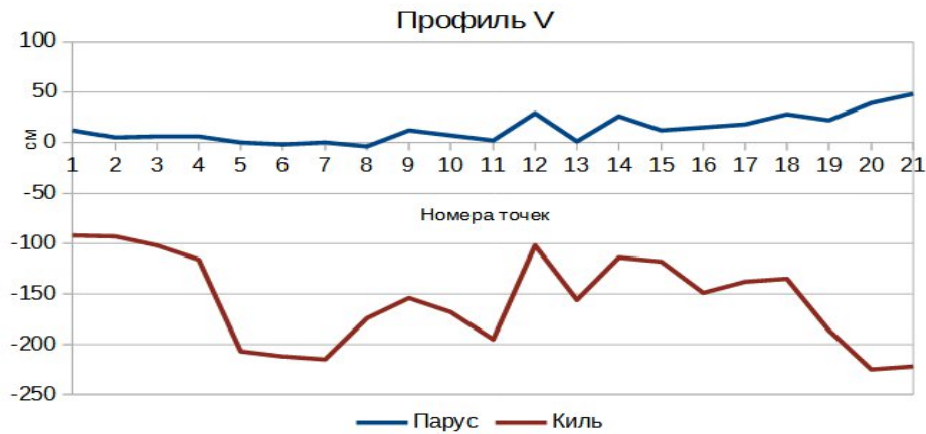


# Гряды Глафира



Старый торос, переживший летнее таяние. Сглаженный парус без возможности различить отдельные блоки. Длина гряды около 90 м, ширина паруса до 6 м, ширина киля 22-28 м. Максимальная высота паруса 123 см, максимальная осадка киля 225 см, максимальная общая толщина 335 см. По данным установленных термокос консолидация киля к началу ноября была относительно небольшой — 52 %. Предположительно торос образовался в конце весны — начале лета 2022.

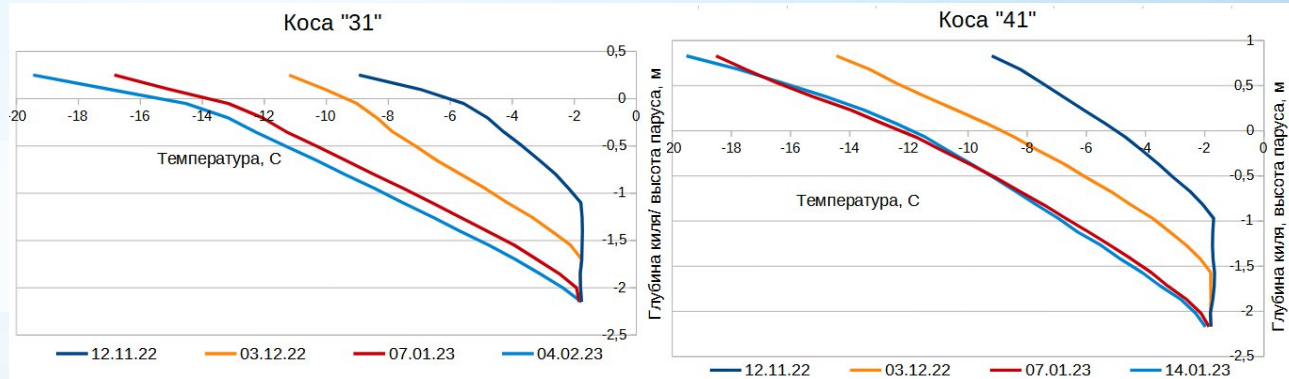
# Профили бурения гряды Глафира (6-12 октября)



7-8 ноября установлены 3 термокосы. С 12 ноября по 12 февраля еженедельно снимались показания с них. Ежемесячно проводились измерения толщины ровного льда (30 точек) и снегомерная съемка на полигоне тороса.



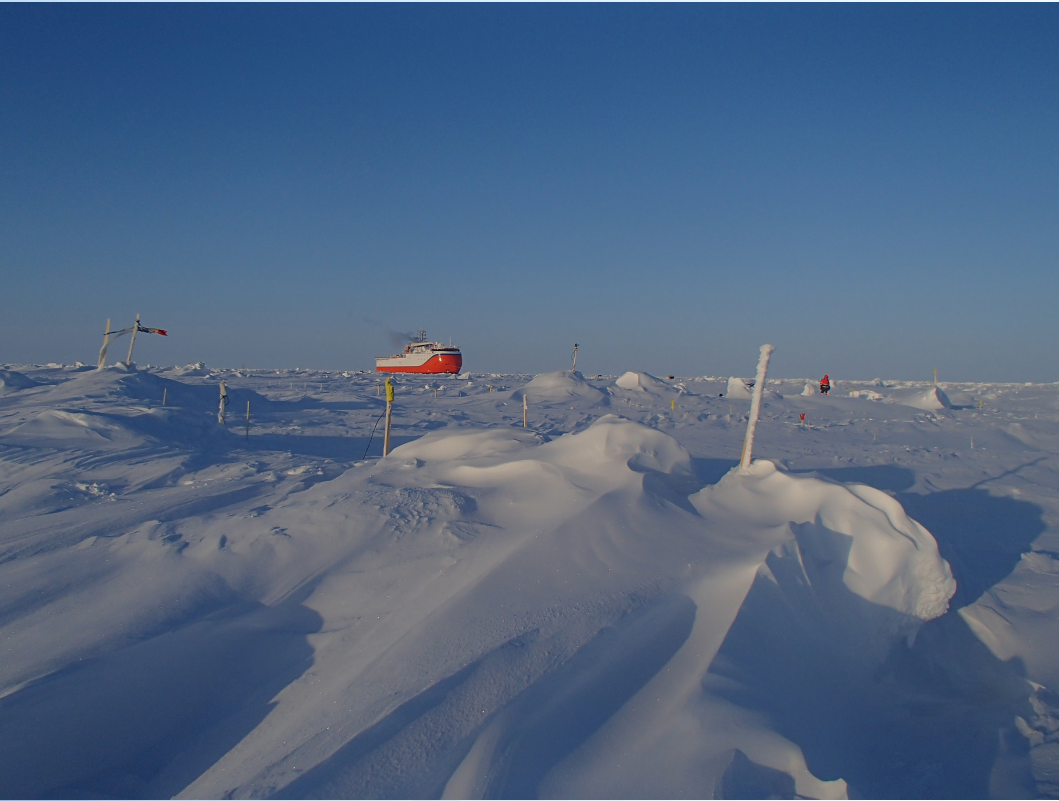
Установка термокосы  
(Фото Ольги Зиминной)



Месяц	Ров, см	Снег ров, см	Снег тор, см	КСН ср, см	КСН/ киль, %	КСН/ Ров	Δ Ров, см	Δ КСН, см
	30 (12)	30 (12)	63	3				
X	81	23						
XI	87	24	33	104	52	1,2	6	
XII	101	29	35	156	78	1,5	14	52
I	118	30	34	196	96	1,7	17	40
II	134	26		207	99	1,5	16	11

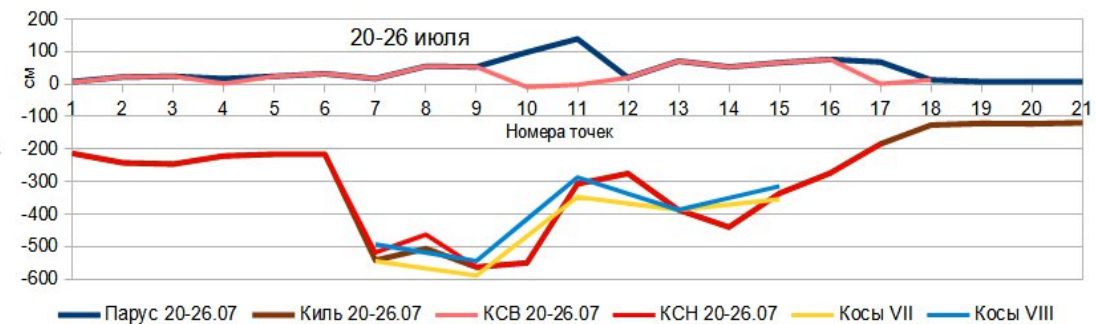
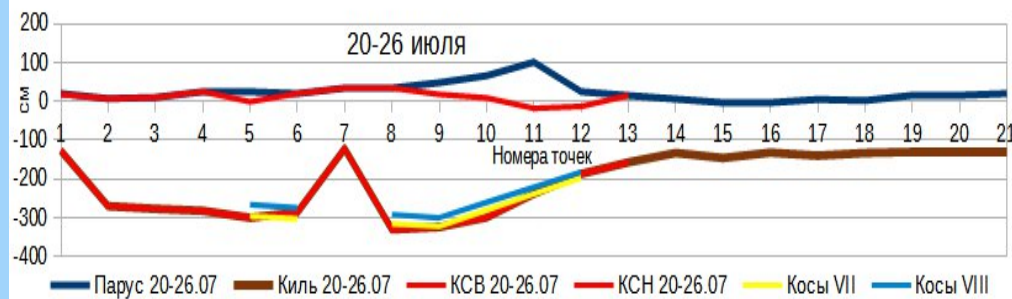
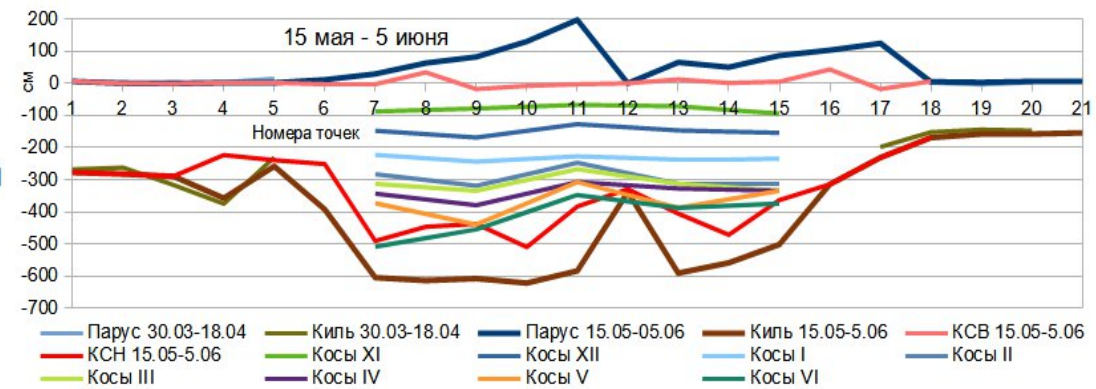
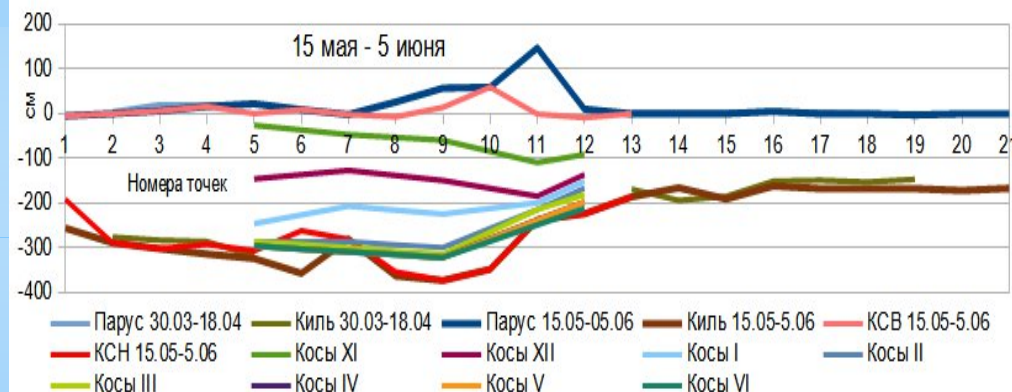
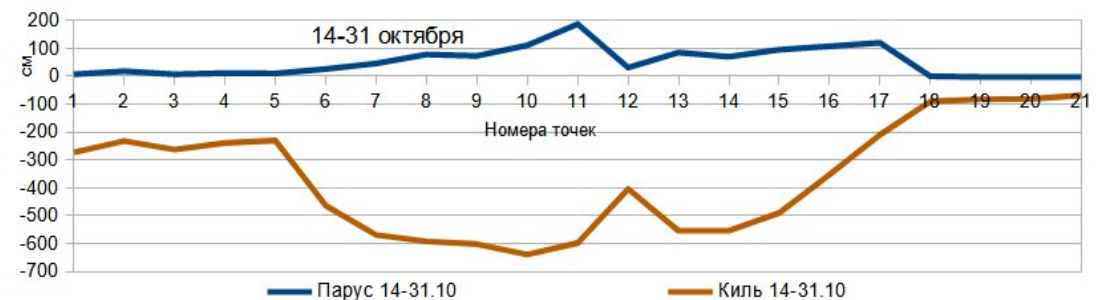
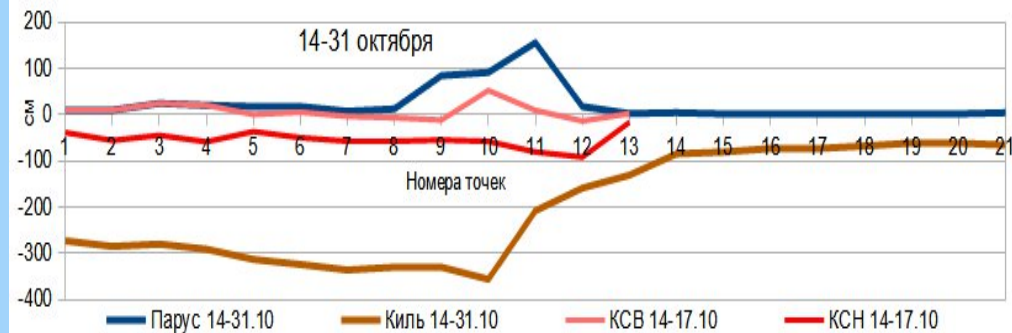
Начало исследований 5 октября, конец наблюдений 15 февраля (торос был разрушен 8 февраля).

# Гряда Валентина

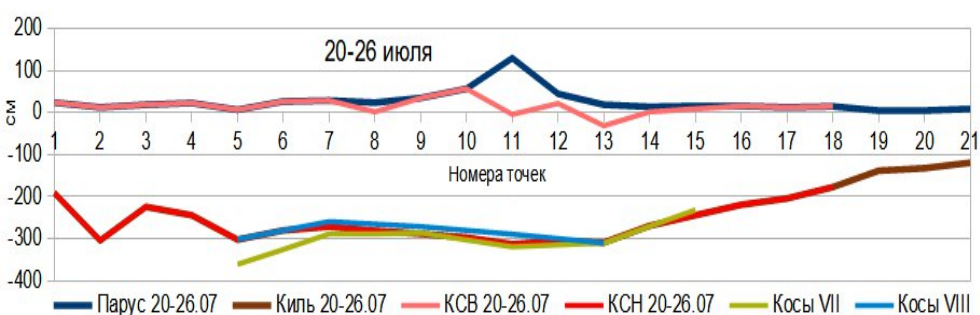
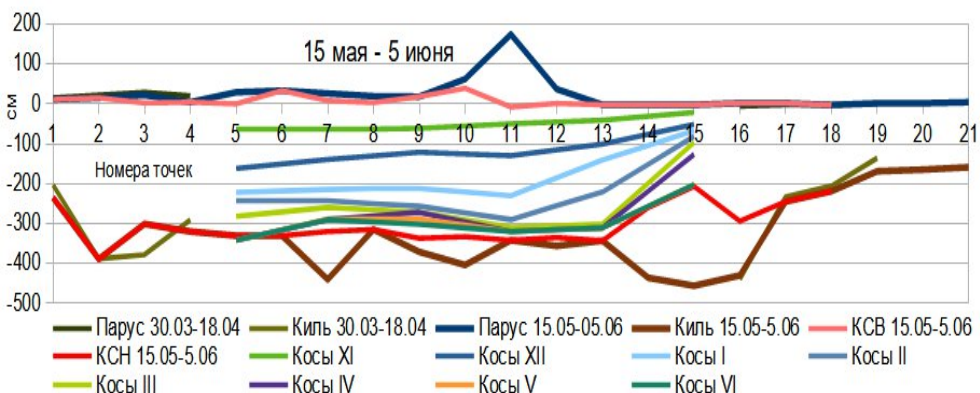
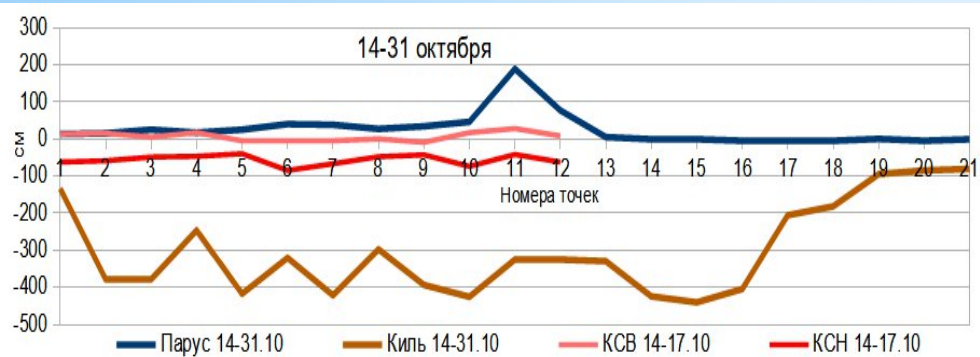


Парус с виду имел округлые очертания, но отдельные блоки можно было различить. Длина гряды около 55 м, средняя по профилям ширина паруса 9,6 м, средняя ширина киля 43 м. Максимальная высота гряды 189 см, максимальная осадка киля 639 см, максимальная общая толщина 785 см. На начало ноября консолидация киля составила только 16 %. Наличие блоков и слабая консолидация говорит о том, что торос вероятно образовался в конце лета или начале осени. Начало исследований 14 октября. Разбито 3 профиля по 40 м (21 точка на каждом через 2 м). Всего 63 точки. Установлено 16 термокос

# Эволюция паруса, киль и КС на профилях I и III



# Эволюция паруса, киль и консолидированного слоя (КС) на профиле II



Месяц	Ров., см	Снег ров, см	Снег тор, см	КСН ср, см	КСН/ киль, %	КСН/ Ров.	Δ Ров, см	ΔКС Н, см
	30 (25)	30 (25)	63 (61)	16 (13)				
X	70***	27***		55 *	16*	0,9 *		
XI	86	24	41	65	16	0,8		
XII	99	32	49	138	34	1,4	13	73
I	112	33	52	204	51	1,8	13	66
II	128	34	52	255	63	2,0	16	51
III	142	33	52	272	66	1,9	14	17
IV	156	41	58	294	72	1,9	14	22
V	169	44	60	315	74	1,9	13	21
VI	170	47	68	334 (317*)	80 (86*)	2,0 (1,9*)	1	19
VII	168	10	31	346 (347 - 15/VII)	83	2,1	-2 (-6**)	12 (3%)
VIII	134	8	12	324 (306*) 314 - 18/VIII	100 (100*)	2,4 (2,3*)	-34	-22

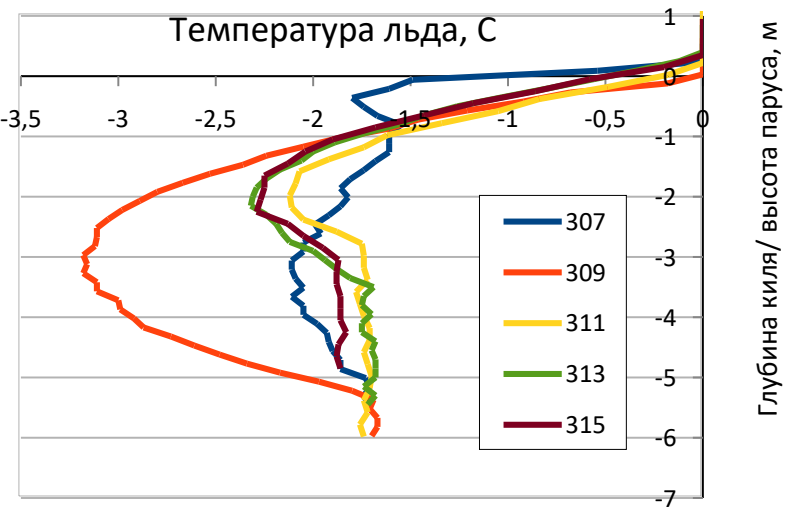
КСН — нижняя граница КС, \* - данные бурения

# Последующие деформации гряды

3 февраля прошла трещина, разделившая начало профиля I, а 8 февраля на ее месте появился небольшой торос.

10 мая через торос прошла новая трещина, разделив полигон тороса на два берега.

Профили пяти термокос профиля III по данным заключительной серии наблюдений от 18 августа



## **Гряда Люба** (образовалась 28.11.2022)



Образовалась 28 ноября в 300 метрах от судна на месте трещины, появившейся 27 ноября. Длина гребня 175 м. Средняя по профилям ширина паруса 5,3 м, средняя ширина киля 26 м. Максимальная высота гряды 214 см, максимальная осадка киля 706 см, максимальная общая толщина 875 см по данным апрельского бурения.

# Бурение гряды Люба



**Шнековое бурение:**  
16-21 декабря  
3-5 апреля

**Электробурение:**  
25 апреля – 13 мая  
29 июня – 6 июля  
1-3 августа

Длина 175 м  
Ширина паруса 5.3 м  
Ширина киля 26 м  
Высота паруса 2.1 м  
Осадка киля 7.1 м  
Общая толщина 8.8 м

*3 профиля по 32 м, 17 точек на каждом через 2 м).  
Всего 51 точка бурения.*

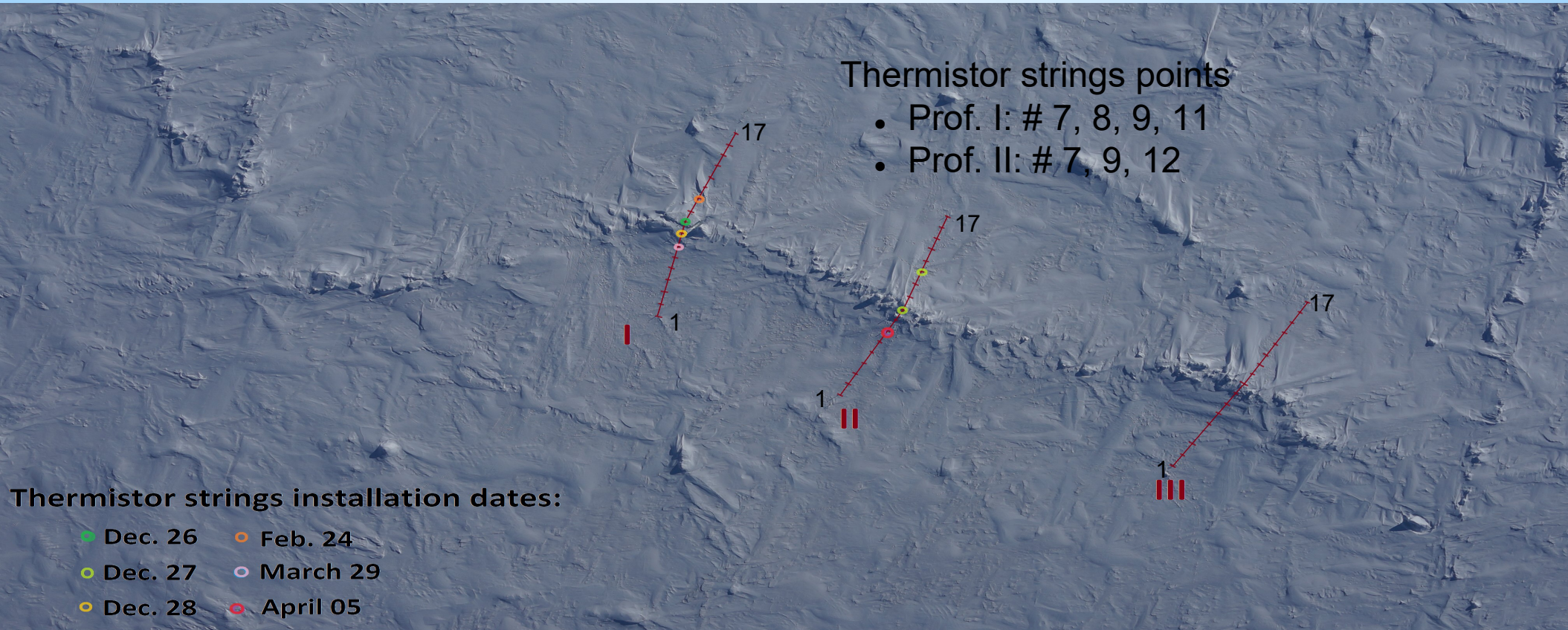
# Термокосы на гряде Люба

Thermistor strings points

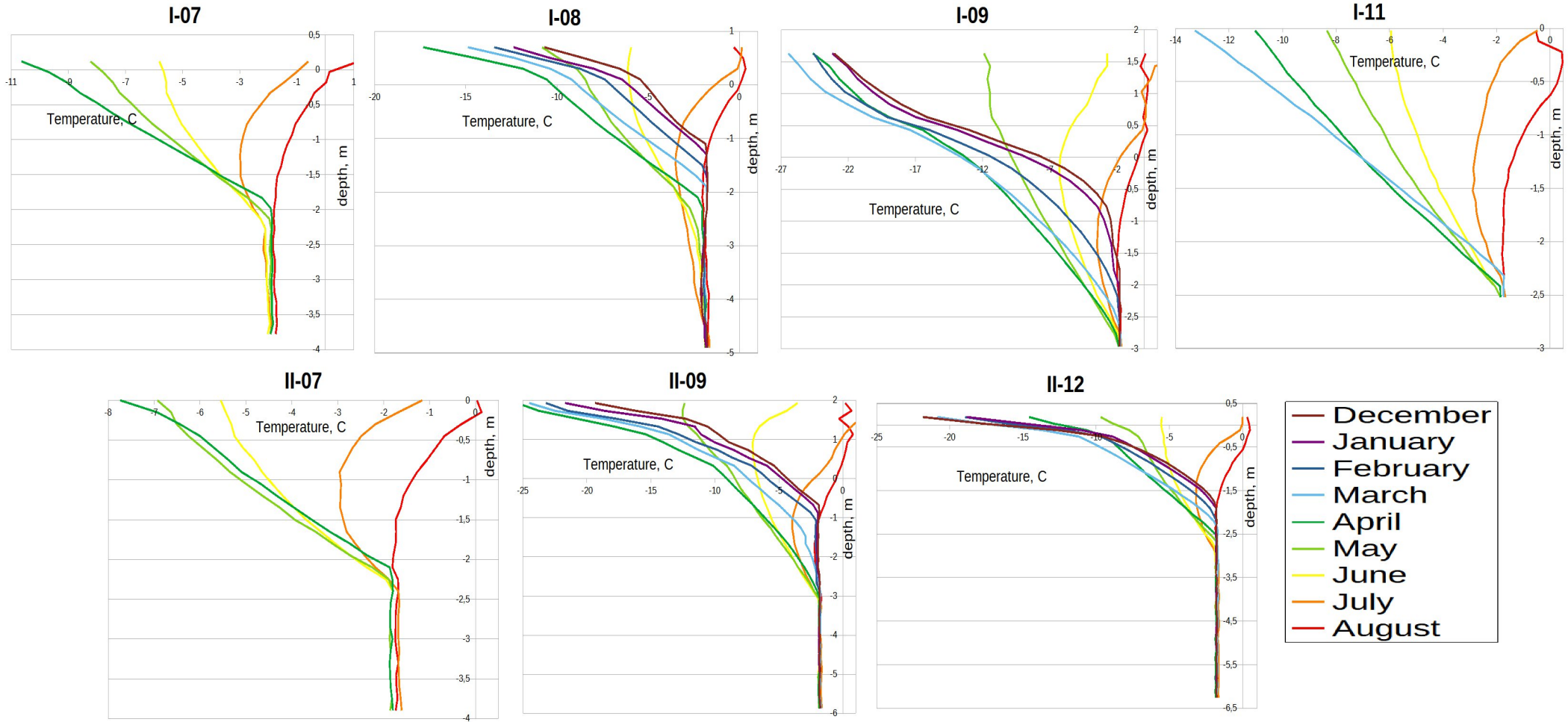
- Prof. I: # 7, 8, 9, 11
- Prof. II: # 7, 9, 12

Thermistor strings installation dates:

- |           |            |
|-----------|------------|
| ■ Dec. 26 | ○ Feb. 24  |
| ● Dec. 27 | ○ March 29 |
| ● Dec. 28 | ○ April 05 |



# Данные термокос на гряде Люба по месяцам (с декабря 2022 по август 2023)



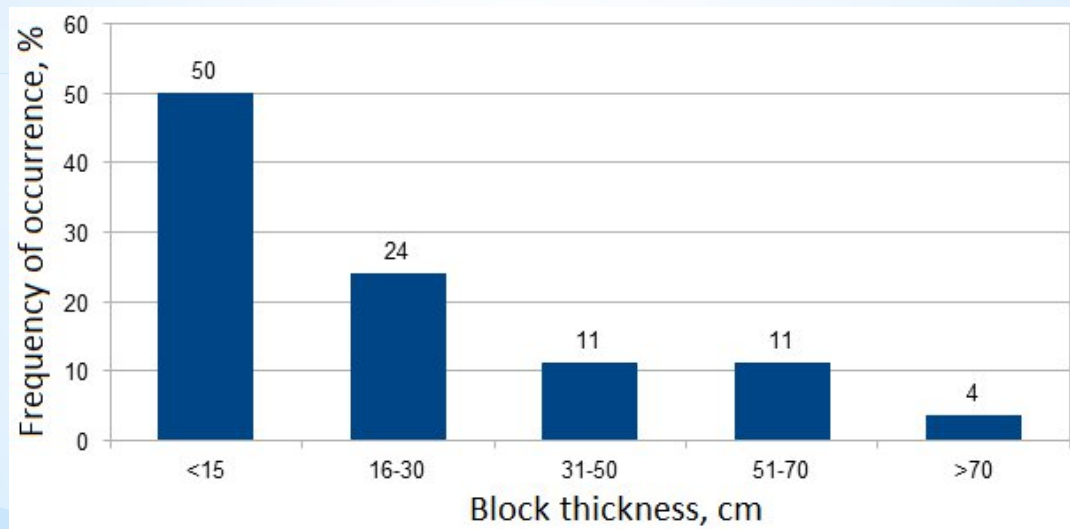
Видеосъемка кия гряды Люба телеуправляемым  
подводным аппаратом (июль 2023 г.)

Thermistor string



# Статистические характеристики 54 блоков паруса гряды Люба, м

	Длина	Ширина	Толщина	Длина/ ширина	Длина / толщина
Среднее	0.98	0.68	0.25	1.44	5.04
Мода	0.45	0.45	0.10	1.0	4.0
Максимум	4.5	2.8	0.92	2.14	12.5
Минимум	0.35	0.2	0.04	1.00	1.8

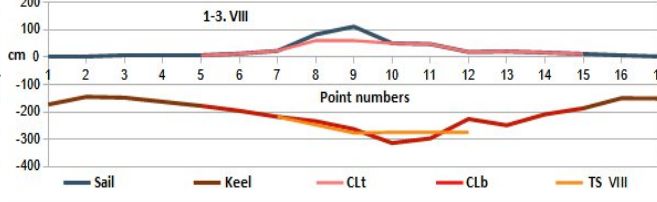
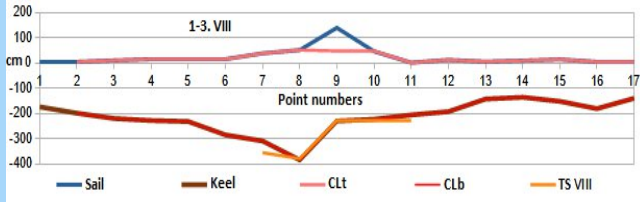
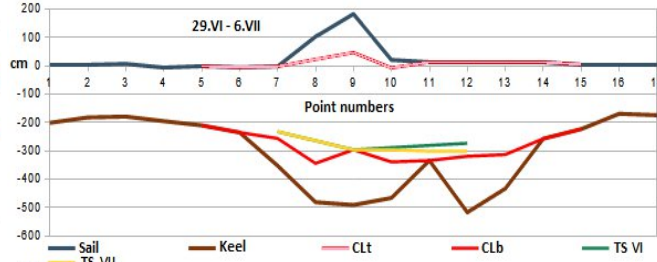
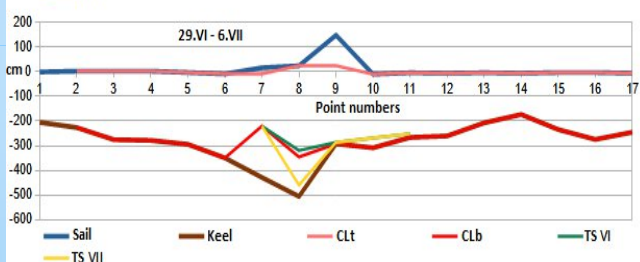
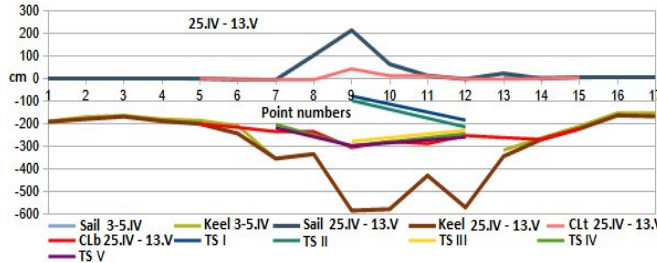
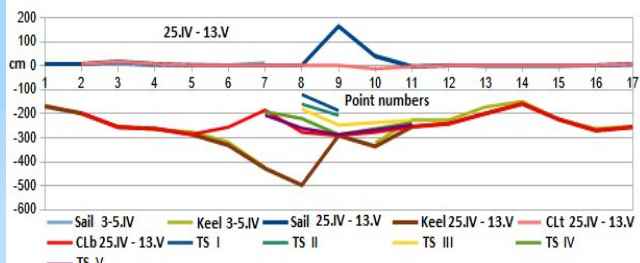
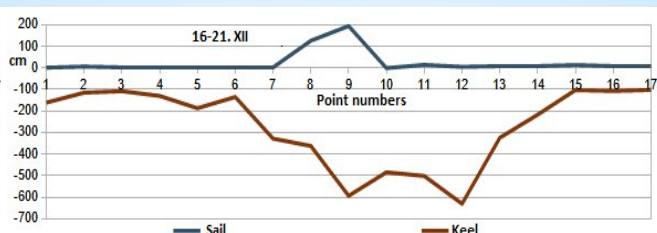
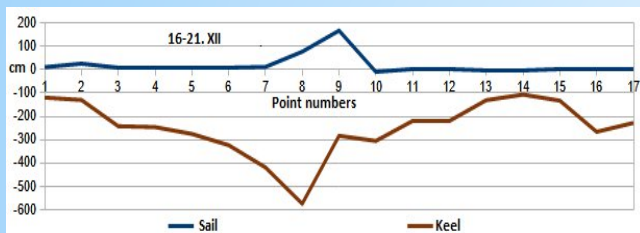


## Морфометрические характеристики гряды Люба по месяцам

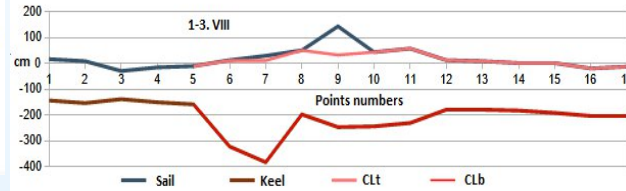
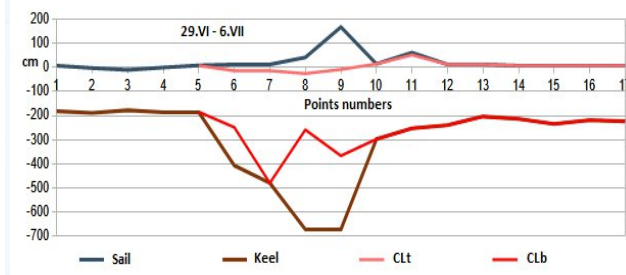
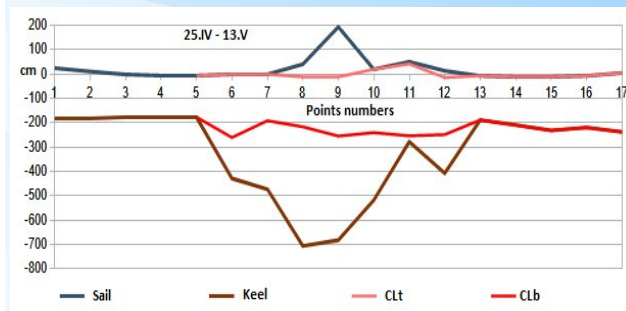
Month	Hi, cm	hi, cm	hr, cm	CLb, cm	CLb/ Keel, %	CLb /Hi	ΔHi, cm	ΔCLb, cm	FDD
Jan.	116	36	51	142	31	1.2			805
Feb.	136	38	55	169	37	1.2	20	27	1650
March	151	41	60	232	54	1.5	15	63	2474
April	166	44	64	237	56	1.4	15	5	3382
May	177	48	76	253 (241 *)	60 (71 *)	1.4 (1.4 *)	11	16	4106
June	183	50	81	269	65	1.5	6	16	4498
July	181	14	40	293 (273 *)	71 (83 *)	1.6 (1.5 *)	-2	24	4558
August	157	7	9	280 (226 *)	100 (100 *)	1.8 (1.4 *)	-24	-13	4580

**Hi** – сред. толщина ровного льда рядом с грядой, **hi** – сред. Толщина снега на ровном льду, **hr** – сред. толщина снега на торосе, **CLb** – нижняя граница консолидированного слоя (КС) относительно ватерлинии по данным термокос, **CLb/Keel** – степень консолидации кия, **CLb /Hi** – отношение нижней границ КС к толщине ровного льда, **ΔHi** – месячное изменение толщины ровного льда, **ΔCLb** месячное изменения положения нижней границы КС за месяц, **FDD** – сумма градусо-дней мороза с даты формирования гряды. Значения толщины КС даются по данным термокос (\* по данным бурения на профилях).

# Эволюция паруса, кия и границ консолидированного слоя на профилях гряды Люба



CLt и CLb – верхняя и нижняя границы КС; римские цифры термокос (TS) соответствуют месяцам



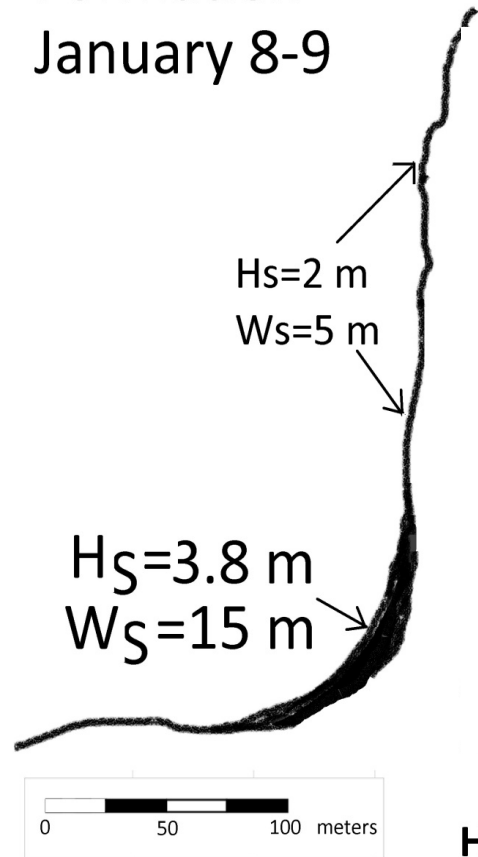
## Морфометрические характеристики гряды Люба по данным бурения (51 точка) на профилях

Drilling dates	Sail max, cm	Sail mean cm	Keel max, cm	Keel mean cm	TT max, cm	TT mean cm	CLt, cm	CLb, cm	CL, cm	CL/TT, %	CLb/Keel, %	CL/Hi	PS	PU	PR
16-21 декабря	193	20	631	295	787	320									
25 апреля – 13 мая	214	24	706	338	875	362	2	241	243	67	71	1.4	0.05	0.10	0.03
29 июня – 6 июля	182	21	672	327	839	349	4	273	276	79	83	1.5	0.08	0.15	0.03
1-3 августа	143	28	385	226	435	254	20	226	246	97	100	1.6	0.03	0	.003

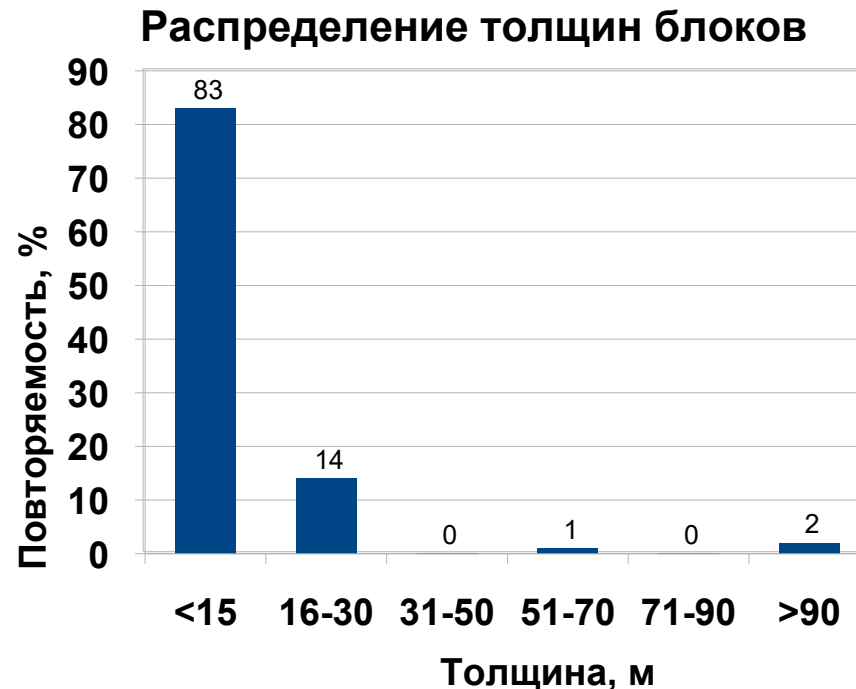
**TT** – общая толщина, **CLt** и **CLb** верхняя и нижняя грани консолидированного слоя (**CL**), **Hi** – толщина ровного льда, **PS** – пористость паруса, **PU** – пористость неконсолидированной части кила, **PR** – пористость всего тороса

# Гряда Аня (образовалась 8-9.01.2023)

Formation  
January 8-9



Ice blocks measurements (January 19-23)



$H_s$  - sail height,  $W_s$  - sail width

Начало исследований **12 января**. Гряда дугообразной формы длиной несколько сотен метров. Максимальная высота паруса в районе закругления гряды 380 см, ширина 15 м. На других участках высота паруса до 2 м, ширина около 5 м.

Подсовы распространены более чем на 20 м от подошвы гребня. Ширину киля определить не удалось. Толщина льдины по данным верхнего слоя 110-130 см. **16 января** у подножья тороса прошла трещина шириной до 10 м. В зоне максимального паруса часть гряды обвалилась в трещину.

**19-23 января** были измерены **100 блоков** паруса тороса.

Исчезла из поля зрения после динамических ледовых процессов **8 февраля**.

# Гряда Ивана (образовалась 26.01.2023)

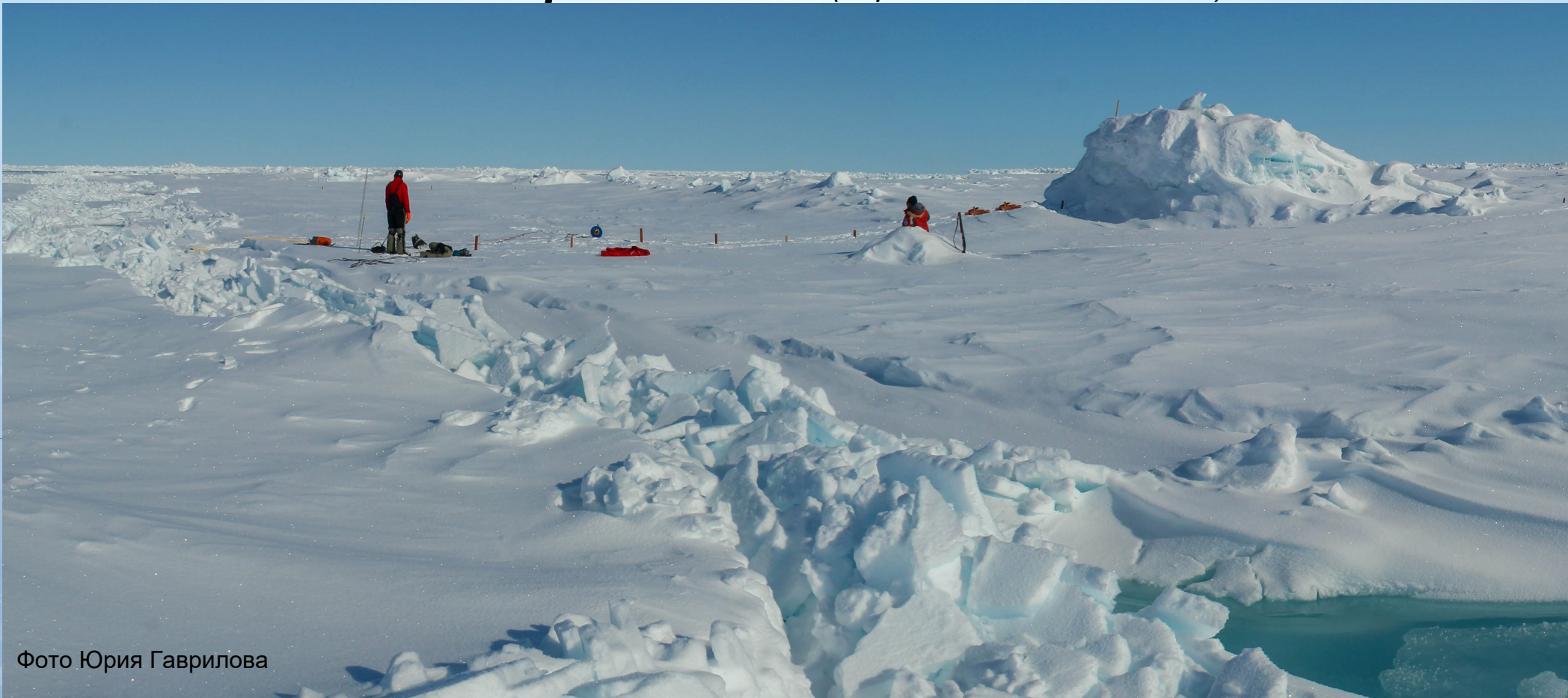
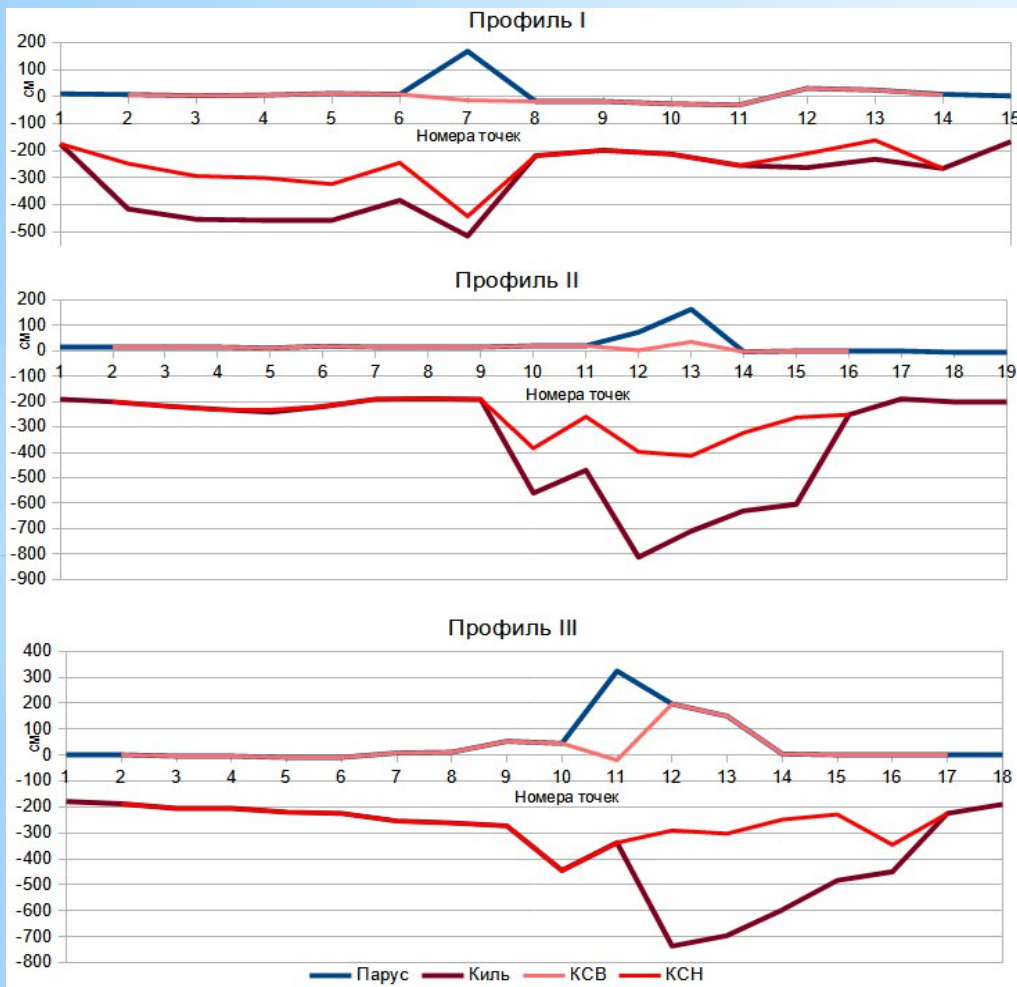


Фото Юрия Гаврилова

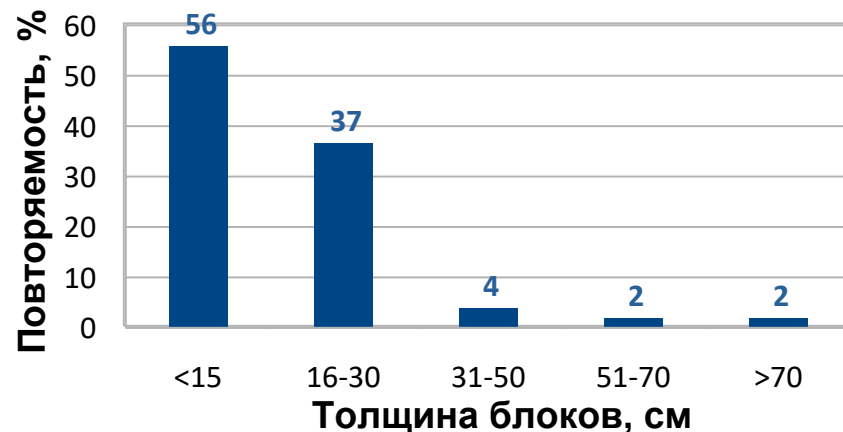
Начало исследований 30 января. Гряда длиной несколько сотен метров. Разбито 3 профиля на расстоянии 86 м. Максимальный парус: высота 4,5 м, ширина 12 м. Ширина паруса на разных участках: 5-8,5 м, ширина кия 26-32 м. Толщина ровного на профиле 1 — 112-142 см (02.02), на профиле 2 — 125-146 см (21.02). 27 и 29 марта измерено 52 блока.

# Основные морфометрические характеристики гряды Ивана по данным бурения (7-18 июня 2023 г.)



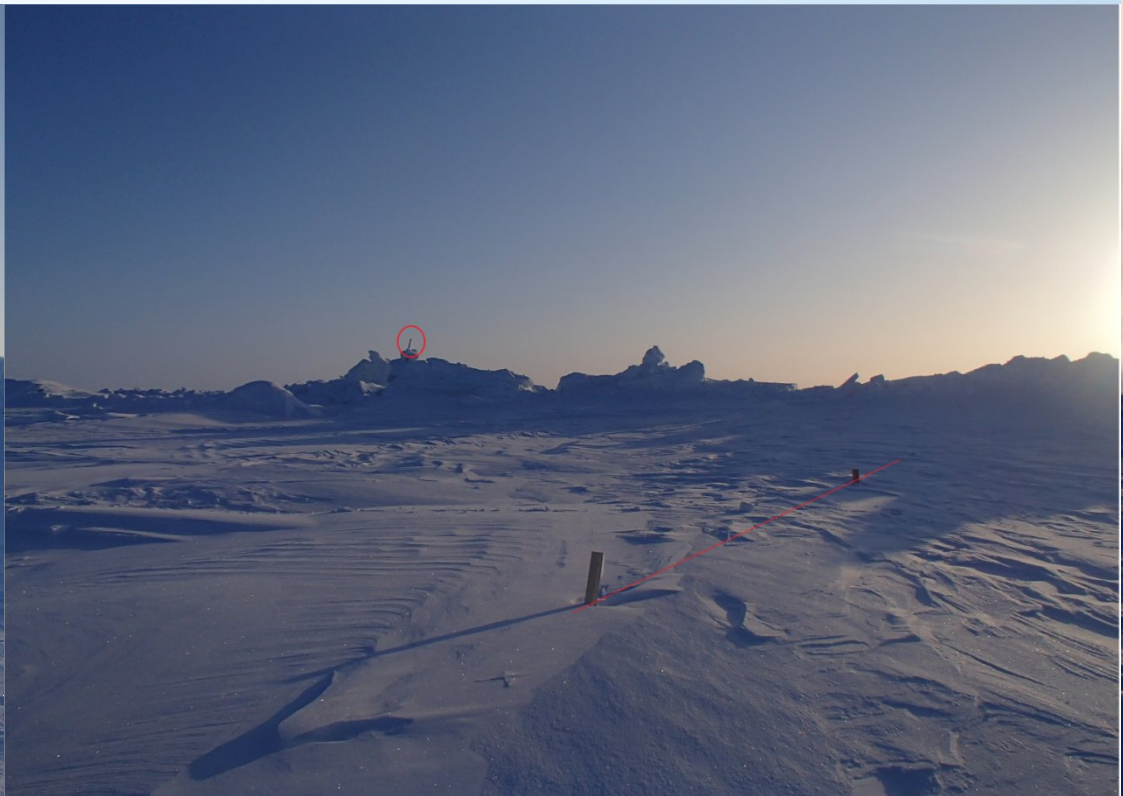
Парус макс, см	Парус ср, см	Киль макс, см	Киль ср, см	Общая толщина макс, см	Общая толщина ср, см
324	30	812	361	933	390
КСВ, см	КСН, см	КС, см	КС/ОТ, %	КСН/Киль, %	КС/Ров
14	-264	277	71	73	1,5
I КС, см	II КС, см	III КС, см	Ров., см		
259	276	293	188		

## Распределение толщин 52 блоков



16-17 июня — гидролокационная и ТПА съемки

# Гряда Миша (образовалась 03.02.2023, отделившись от гряды Ивана)



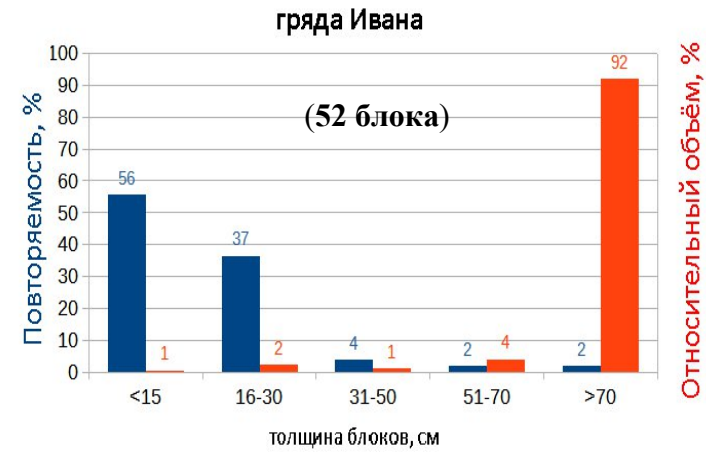
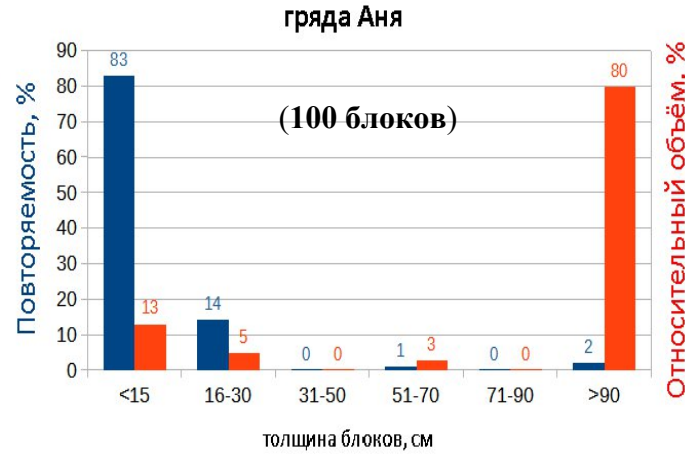
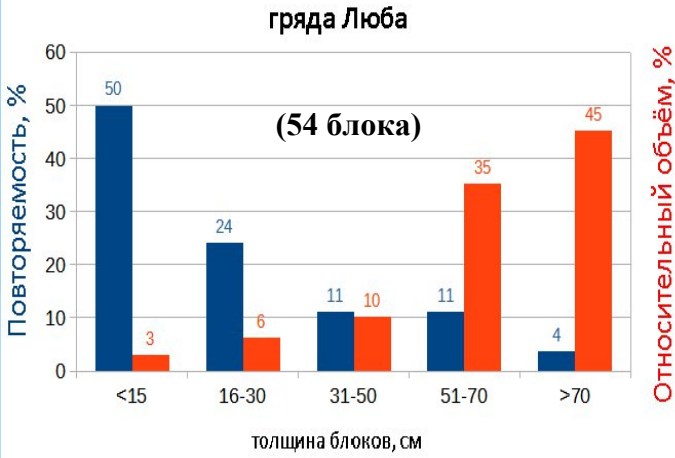
Начало исследований 30 января как часть гряды Ивана. Длина более 100 метров. Разбит 1 профиль.

**Максимальные значения паруса:** 3,2 м (ширина 9,8 м) и 2,7 м (ширина 7,8 м), ширина паруса на других участках 5-7 м. **Крупные блоки толщиной** 130-140 см. Толщины разных блоков: 5, 10 (преобладали), 30 см.

**Ширина кия** на профиле 18 м. **Толщина ровного льда** — 121-136 см (06.02).

**8-9 февраля** в результате активной динамики льда торос претерпел новую деформацию: вешка на вершине была смещена на 15 м относительно ближней части профиля, а разметку по ту сторону гряды не удалось обнаружить.

# Деламинация (продольное расслоение) льда при торособразовании



## Толщина ровного льда (см) на дату образования тороса

Гряда тороса	Люба	Аня	Ивана
Дата образования тороса	28.11.2022	8.01.2023	26.01.2023
Основной полигон	92	119	125
Дополнительный полигон	96	111	121
Полигон у гряды Глафира	94	118	125
Полигон у гряды Валентина	92	112	120
Полигон у гряды Люба	-	116	126
<b>Среднее</b>	<b>94</b>	<b>114</b>	<b>123</b>
<b>Максимальная толщина блока в торосе</b>	<b>92</b>	<b>105</b>	<b>158</b>

**Грищенко В.Д. (1988)** Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Тр. ААНИИ. Т. 401,  
**Романов И.П. (1992)** Ледяной покров Арктического бассейна  
**Nøyland K.V., Løset S. (1999)** Monitoring and observation of the formation of a first-year ice ridge-field // Proc. of POAC 99

# Определение толщины КС по сумме градусо-дней мороза и толщине ровного льда

Форма закона Стефана:

$$H = k \sqrt{FDD}$$

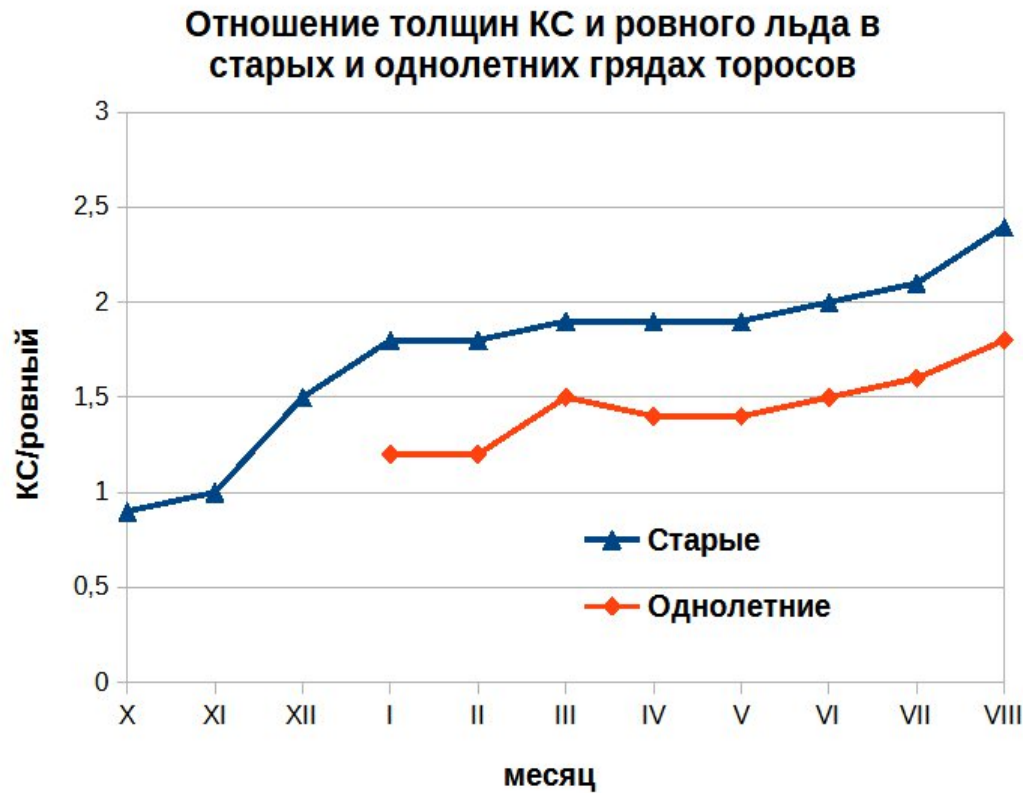
Leppäranta and Nakala (1992):

$$H_{CL} = a \sqrt{\frac{FDD}{p}}$$

FDD – сумма градусо-дней мороза

$p$  – пористость неконсолидированного кила

	гряда Люба	гряда Ивана
образовалась	28.11.22	26.01.23
исследовалась	04.05.23	07.06.23
FDD	4175	3016
Толщина КС, м	2,43	2,77
$k$	0,038	0,050



Исследование торосов на СП-41 проводилось в течение 11 месяцев (с октября 2022 г. по август 2023 г.).

Было исследовано 6 гряд торосов разных размеров и возраста; наиболее подробно изучены 2 однолетние и 2 старые гряды.

*Промежуточные результаты:*

- 1. Собраны данные по эволюции основных морфометрических параметров гряд старых и однолетних торосов в течение зимнего и летнего периодов.*
- 2. По данным электробурения с записью скорости бурения и данным термокос получены значения ключевого для определения ледовых нагрузок параметра – толщины консолидированного слоя (КС) для разных торосов в течение всего периода наблюдений. Максимальной толщины КС достигает в июле.*
- 3. Определена динамика процесса консолидации внутренней части торосов в результате атмосферного выхолаживания в зимний период и таяния в летний. Максимальный вклад летних процессов в общий рост КС по нашим оценкам составил 8 %.*
- 4. Определены коэффициенты, связывающие толщину КС однолетних торосов с суммой градусо-дней мороза.*
- 5. Установлены соотношения между средними толщинами КС и ровного льда в течение всего периода наблюдений для гряд разного возраста.*
- 6. Выявлен малоизученный процесс продольного расслоения (деламинации) льда при торосообразовании из старого льда.*

# Публикации

Roman B. Guzenko, Ruslan I. May, Yuri G. Gavrilov, Victor V. Kharitonov, Stepan V. Khotchenkov (2024). “Evolution of morphometry and internal structure of first-year ridge during many months of observations at the drifting station "North Pole-41",” Proc 34th Int Offshore and Polar Eng Conf, Rodos, Greece, June 16–21, 2024, ISOPE, pp. 2023–2029.

Roman B. Guzenko, Ruslan I. May, Yuri G. Gavrilov, Victor V. Kharitonov, Stepan V. Khotchenkov (2025). “Formation and Consolidation of a First-year Ridge Based on Nine Months of Observations at the Drifting Station “North Pole-41”.” International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 35, No. 2, June 2025, pp. 130–137.

Roman B. Guzenko, Ruslan I. May, Ivan A. Svistunov, Vladimir A. Borodkin, Yuri G. Gavrilov, Stepan V. Khotchenkov (2025). “Peculiarities of the Formation of Ice Ridges from Old Ice,” Proc 35th Int Offshore and Polar Eng Conf, Seoul/Goyang, Korea, June 1-6, 2025, ISOPE, pp. 2085–2092.

Roman B. Guzenko, Ruslan I. May, Ivan A. Svistunov, Vladimir A. Borodkin, Yuri G. Gavrilov, Stepan V. Khotchenkov and Artyom A. Vibe (2026). “Ice Ridge Formation Due to Deformation of Old Ice Floes. How Was It?”. International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 36, No. 2, June 2026 (in press).



**Спасибо за внимание**



Анастасия Кирилова  
СП-41. Всторошенный лёд в рассветных лучах