V.M. SMOLYANITSKY, A.B. TURYAKOV et al.

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348 УДК 551.326.7 (326.02)



#### ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

**ORIGINAL ARTICLE** 

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИН ЛЬДА И ВЫСОТ СНЕГА, НАБЛЮДЕНИЙ CRYOSAT-2 И ЧИСЛЕННЫХ ОЦЕНОК СИСТЕМЫ PIOMAS

В.М. СМОЛЯНИЦКИЙ<sup>\*</sup>, А.Б. ТЮРЯКОВ, К.В. ФИЛЬЧУК, И.Е. ФРОЛОВ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

\*vms@aari.aq

### Резюме

Представлены результаты сравнения прямых измерений толшин льда и высот снега в точках выполнения гидрологических станций экспедиции «Трансарктика-2019» с альтиметрическими наблюдениями ИСЗ CrvoSat-2 и численными оценками Системы панарктического численного моделирования льда и океана (PIOMAS). Показано существенно лучшее соответствие пространственной изменчивости прямых измерений и расчетов толшин льда на основе спутниковых наблюдений в сравнении с численными оценками системы и ассимиляции данных PIOMAS. Пробная коррекция алгоритма расчета толщины льда путем замены климатических значений плотности льда, плотности и высоты снега на данные прямых измерений значимо улучшает качество расчета толщины льда по наблюдениям ИСЗ. Полученные средние и среднеквадратические разности для толщин льда (+44/+96 см для CrvoSat-2 без коррекции, +30/+95 см для CryoSat-2 с коррекцией, -14/+81 см для системы PIOMAS) и высот снега (-4/+12 см для CryoSat-2, -15/+12 см для системы PIOMAS) показывают масштабы неопределенности дистанционной оценки толщин морского льда и высот снега для районов преобладания средних и толстых однолетних льдов. Сравнение с наблюдениями ИСЗ и численными оценками предыдущих лет показывают, что экспедиция ААНИИ фактически была проведена в один из наиболее благоприятных для ледовых исследований годов последнего десятилетия для данного региона — средняя толщина льда в апреле 2019 г. была на 15 — 28 см выше таковой для интервала 2011 — 2019 гг. при несколько меньшей (1 — 2 см) высоте снежного покрова. Сравнение с данными ледового картирования показывает, что в более ранний период 1970 -1990-х гг. данный район характеризовался значительно более толстыми старыми льдами с характерными толщинами на ~60 см больше, чем в апреле 2019 г. Привлечение данных высокоширотных экспедиций «Север» 1950 — 1970-х гг. не позволяет дать однозначный отчет о характере наблюденных в апреле 2019 г. аномалий толщин льда и высот снега.

Ключевые слова: высота снега, контактные наблюдения, превышение льда, толщина льда, «Трансарктика-2019», CryoSat-2, PIOMAS.

Для цитирования: Смоляницкий В.М., Тюряков А.Б., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat-2 и численных оценок системы PIOMAS // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. №. 3. С. 337 — 348. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.

Поступила 16.07.2020	После переработки 9.09.2020	Принята 11.09.2020		
ARCTIC AND ANTARCTIC RE	SEARCH * 2020 * 66 (3)	337		

# COMPARISON OF DIRECT MEASUREMENTS OF SEA ICE THICKNESS AND SNOW HEIGHT, CRYOSAT-2 OBSERVATIONS AND PIOMAS NUMERICAL ESTIMATES

VASILY M. SMOLYANITSKY, ANDREY B. TURYAKOV, KIRILL V. FILCHUK, IVAN E. FROLOV

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

\*vms@aari.aq

## Summary

The paper presents the results of comparison of contact measurements of ice thicknesses and snow heights performed at the points of the hydrological stations of the "Transarktika-2019" expedition in April 2019 north of Franz-Josef Land archipelago, with altimetry observations of the Cryosat-2 satellite and numerical estimates of the PIOMAS (Pan-Arctic numerical Ice and Ocean Modeling system and data Assimilation). A significantly better correspondence is predictably shown between the variability of the ice thickness directly measured and observed using the CryoSat-2 satellite than that for the numerical PIOMAS system estimates. A trial correction of the algorithm for calculating the ice thickness by replacing the climatic values of the ice density, snow density and height with data from direct measurements also predictably improves the quality of calculating the ice thickness from satellite observations. The mean / route mean square differences obtained for ice thicknesses (+44/+96 cm for uncorrected and +30/+95 cm for corrected CryoSat-2 satellite, -14/+81 cm for PIOMAS system) and snow height (-4/+12 cm for CryoSat-2 satellite, -15/+12 cm for PIOMAS system) show the scale of uncertainty in estimating sea ice thickness and snow height for areas dominated by medium and thick first-year ice.

An anomaly of the ice thicknesses observed during the expedition is given in comparison with the background characteristics based on historical ice charting data for 1970s — 1990s, earlier High-Arctic aircraft "Sever" expeditions during 1950s — 1970s and the stated remote observations and numerical estimates for 2000s — 2019. Comparison shows that the AARI expedition was actually carried out in one of the most favorable years for ice research in the last decade for this region — the average ice thickness in April 2019 was 15 — 28 cm higher than that for the interval 2011 — 2019 with a slightly lower (1 — 2 cm) height of the snow cover. In the earlier period of the 1970 — 1990s this area was characterized by significantly thicker old ice with characteristic thicknesses ~ 60 cm more than in April 2019.

Keywords: CryoSat-2, ice freeboard, ice thickness, in situ observations, PIOMAS, snow height, "Transarktika-2019".

For Citation: *Smolyanitsky V.M., Turyakov A.B., Filchuk K.V., Frolov I.E.* Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 337 — 348. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.

Received 16.07.2020

### Revised 9.09.2020

Accepted 11.09.2020

### введение

Комплексный характер экспедиции «Трансарктика-2019», проведенной в марте — мае 2019 г. на акватории Арктического бассейна к северу от архипелага Земля Франца-Иосифа [1] в динамичном районе преобладания однолетних толстых льдов, позволяет оценить неопределенность ряда климатически значимых переменных морской среды Арктики. В настоящей статье рассматриваются результаты сравнительного анализа контактных измерений и неконтактных оценок двух параметров морского льда — его толщины и высоты снежного покрова. Наряду с общей сплоченностью, данные параметры являются ключевыми при расчете объема морского льда Арктики,

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ \* 2020 \* 66 (3)

## В.М. СМОЛЯНИЦКИЙ, А.Б. ТЮРЯКОВ и др.

V.M. SMOLYANITSKY, A.B. TURYAKOV et al.

достигающего в последние годы экстремально низких значений [2]. При этом их оценки на основе спутникового дистанционного зондирования и по данным численного моделирования характеризуются значительно большей неопределенностью по сравнению с общей сплоченностью [3, 4], в целом не удовлетворяют потребностям Глобальной системы наблюдений за климатом — ГСНК [5] и, естественно, требуют дальнейшей валидации по наблюдениям *in situ*.

В качестве первого источника неконтактных оценок толщин льда выбраны данные радиолокационного высотомера ИСЗ CryoSat-2. Данный ИСЗ является в настоящее время базовым источником климатических оценок толщин льда в панарктическом масштабе для европейских проектов по исследованию изменений климата [6]. Так же, как и другие ИСЗ с лидарными (IceSat, IceSat-2) и радиолокационными (Envisat, Sentinel-3 и т.д.) высотомерами, измерение толщины морского льда CryoSat-2 выполняет не напрямую, а через измерения одной из составляющих толщины — превышения морского льда над уровнем моря. Расчет собственно толщины морского льда выполняется по измерениям превышения исходя из условия гидростатического равновесия надводной части снежно-ледяного покрова и осадки морского льда [7]. Поскольку все способы дистанционного измерения параметров снега на льду, как и физических свойств льда, находятся в стадии разработки, для практических целей во всех алгоритмах оценки толщин льда по наблюдениям альтиметров используются климатические значения плотности льда, высоты и плотности снега [8] и только в редких случаях — данные контактных измерений.

Второй источник данных для сравнительного анализа определен как данные оценок толщин льда и высот снега Системы панарктического численного моделирования льда и океана и ассимиляции данных (PIOMAS) [9]. В системе PIOMAS совмещена распараллеленная океаническая модель и 12-категорийная динамикотермодинамическая модель толщины и энтальпии морского льда на генерализированной криволинейной ортогональной сетке [10]. PIOMAS обеспечивает учет основных характеристик циркуляции в верхнем слое океана в полярных областях Земли, ассимиляцию ряда наблюдений ИСЗ (общая сплоченность и заснеженность морского льда, температура поверхности воды). В качестве атмосферного форсинга используются данные реанализа NCEP/NCAR. Наряду с CryoSat-2, система PIOMAS является одним из наиболее распространенных источников информации при оценке климатических изменений толщин и объема морского льда Арктики [2], хотя, так же как и CryoSat-2, пока не удовлетворяет требованиям ГСНК.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В качестве информации *in situ* использованы исходные данные измерений толщин льда (минимальной, максимальной), высот снега (минимальной, максимальной), балла торосистости и максимальной высоты торосов в 59 точках выполнения гидрологических станций экспедиции «Трансарктика-2019» [1] за период 28.03 — 04.05.2019 г. в Арктическом бассейне к северу от архипелага Земля Франца-Иосифа. Все измерения параметров льда и снега выполнялись по профилям длиной 30...90 метров от точки посадки вертолета к краю льдины. Положение точек выполнения наблюдений и максимальные измеренные толщины льда представлены на рис. 1. В качестве значений плотностей льда и снега использованы наблюдения единичного вертикального профиля указанных параметров на участке ровного заснеженного льда (средняя высота снега — 21 см, средняя толщина льда — 83 см) ледомерного полигона экспедиции 19 апреля 2019 г. (см. рис. 1).



Рис. 1. Положение точек измерений *in situ* толщин льда и снега и оценок значений толщины льда на основе наблюдений ИСЗ CryoSat-2 по району экспедиции «Трансарктика-2019» за 28.03 — 04.05.2019 г. Дополнительно указаны измеренные максимальные значения толщины льда и положение узлов криволинейной сетки PIOMAS

Fig. 1. Location of the *in-situ* measurement of ice thickness and snow height and CryoSat-2 ice thickness estimates within the "Transarktika-2019" expedition area during March 28 — May 4, 2019. Additionally, the measured maximum values of the ice thickness and the position of the nodes of the PIOMAS curvilinear grid are depicted

В качестве дистанционных оценок толщин льда использованы данные CryoSat-2 уровня обработки L3 [8], обобщенные за 7-дневные периоды с 25 марта по 5 мая 2019 г. по прямоугольной сетке полярной азимутальной проекции Ламберта с шагом 25 км с портала Института полярных исследований им. Альфреда Вегенера. Положения и значения средних по ячейкам сетки значений толщины льда по району экспедиции «Трансарктика-2019» за указанные 7-дневные периоды 2019 г. также представлены на рис. 1.

Модельные данные проекта PIOMAS получены с портала проекта [9] в форме ежедневных оценок частных сплоченностей 12 интервальных оценок толщин льда и высоты снега за период с 28 марта по 4 мая 2019 г. Использованные центроиды 12 интервалов толщин льда взяты из описания ледовой модели, приведенной в [10] и равны, соответственно, 5, 26, 71, 146, 261, 423, 639, 910, 1239, 1624, 2062 и 2549 см. Положение узлов криволинейной сетки проекта PIOMAS представлено на рис. 1.

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ

Сравнение измеренных («Трансарктика-2019»), оцененных (ИСЗ CryoSat-2) и рассчитанных (система PIOMAS) значений толщин льда и высот снега выполнено

в двух вариантах — во-первых, оценки разности между значениями параметров, полученных различными методами, и, во-вторых, оценки попадания значений параметров, полученных одним методом, в интервальные значения параметра, полученного другим методом.

За «измеренную» толщину льда  $SIT_o$  принималось среднее значение между измеренными минимальной и максимальной толщиной льда, скорректированное в сторону увеличения за счет балла торосистости (в соответствии с [11] на 20 % толщины на 1 балл), а за измеренный интервал соответственно интервал между минимальной толщиной льда и  $SIT_o$ .

За «оцененную» толщину льда  $SIT_c$  принималось значение переменной SIT исходных данных [8], за интервал — значения  $SIT_c$  с вычетом и прибавлением переменной  $\sigma_{STT}$ 

За «рассчитанную» толщину льда  $SIT_p$  принимались среднее значение по всем 12 градациям, за «рассчитанную интервальную» толщину льда  $SIT_{p36}$  принималось среднее значение с третьей по шестую градацию (центроиды интервалов 71, 146, 261 и 423 см соответственно). Основанием для отбрасывания более тонких (центроиды 5, 26 см) и более толстых (центроиды 639, 910, 1239, 1624, 2062, 2549 см) является выбор мест выполнения гидрологических станций на участках достаточно толстого, но ровного льда.

Аналогичным образом выполнялось построение значений и интервалов значений «измеренных» SD<sub>o</sub>, «оцененных» SD<sub>c</sub> и «рассчитанных» SD<sub>p</sub> значений высот снега — естественно, без учета балла торосистости и интервалов толщин льда.

Расчет «оцененной скорректированной» толщины льда  $SIT_{co}$  выполнялся на основе переменной *frb* [8] и переменных  $SD_c$ ,  $\rho_{ic}$  и  $\rho_{sc}$  с изменением их значений с климатических на измеренные  $SD_a$ ,  $\rho_{ia}$  и  $\rho_{sa}$ .

Ход значений переменных  $SIT_o$ ,  $SIT_co$ ,  $SIT_p$  в зависимости от номера гидрологической станции и совместные гистограммы распределений  $SIT_o$ ,  $SIT_co$  и  $SIT_p$  представлены на рис. 2. Совместные гистограммы распределения высот снега  $SD_o$ ,  $SD_co$ 



Рис. 2. Распределение измеренных («Трансарктика-2019»), скорректированных оцененных (CryoSat-2) и рассчитанных (PIOMAS) значений толщин морского льда в зависимости от точки выполнения гидрологической станции (a) и в виде гистограмм ( $\delta$ ) указанных переменных

Fig. 2. Measured ("Transarktika-2019"), corrected estimated (CryoSat-2) and calculated (PIOMAS) values of sea ice thickness at the points of hydrological stations (*a*) and as histograms ( $\delta$ ) of the stated variables



Рис. 3. Гистограммы измеренных («Трансарктика-2019»), оцененных (CryoSat-2) и рассчитанных (PIOMAS) значений высоты снега

Fig. 3. Measured ("Transarktika-2019"), estimated (CryoSat-2) and calculated (PIOMAS) values of snow height

 $SD_{p}$  представлены на рис. 3. Статистические характеристики указанных переменных и их разностей представлены в таблицах 1 и 2.

Анализ значений табл. 1 и 2 показывает, что некорректированные оценки толщины льда на основе высотомера ИСЗ CryoSat-2 в среднем на 44 см выше значений измерений при СКО 96 см. Для оцененных скорректированных значений разность значимо уменьшается и составляет +30 см при СКО 95 см. Оценки высоты снега для ИСЗ CryoSat-2 ниже на 4 см при СКО 12 см. Также отметим, что измеренная плотность снега  $\rho_{so}$  фактически оказалась на ~20 % меньше использованной согласно [8] климатической  $\rho_{sc}$  (254 г/дм<sup>3</sup> против 316 г/дм<sup>3</sup>). Измеренная плотность льда ріо также оказалась меньше на 1 % климатической  $\rho_{io}$  (910 г/дм<sup>3</sup> против 916 г/дм<sup>3</sup>). Иными словами, лед в районе экспедиции в целом был более пресным и более заснеженным, причем снежный покров был более свежим.

Таблица 1

## Статистические характеристики измеренных («Трансарктика-2019»), оцененных (ИСЗ CryoSat-2) и рассчитанных (система PIOMAS) значений толщин и плотностей льда, высот и плотностей снега

Table 1

Параметр	Среднее	СКО	Минимум	Максимум
$SIT_{o}$ , см	193,0	81,6	63,2	421,5
<i>SD</i> <sup>°</sup> , см	24,2	11,9	5,0	48,0
$\rho_{io}$ , г/дм <sup>3</sup>	909,8	-	906,9	912,0
$\rho_{so}$ г/дм <sup>3</sup>	254,7	-	253,4	256,1
$SIT_{c}$ , см	212,2	59,2	77,0	334,9
SIT <sub>co</sub> , см	198,7	63,9	42,4	362,9
<i>SD</i> <sup>°</sup> , см	18,6	1,6	17,5	25,1
$\rho_{ic}$ $\Gamma/дM^3$	915,8	3,2	903,1	916,7
$\rho_{sc}^{\kappa}$ г/дм <sup>3</sup>	316,4	1,5	316,0	322,0
$SIT_{n}$ , см	178,8	4,5	168,9	194,7
$SIT_{n36}^{P}$ см	168,4	4,3	159,6	180,0
$SD_{p}^{PSS}$ см	9,4	0,8	8,0	11,0
r				

Statistics of the measured ("Transarktika-2019"), observed (CryoSat-2) and calculated (PIOMAS) sea ice thickness and density and snow height and density values

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ \* 2020 \* 66 (3)

### Таблица 2

## Статистические характеристики разностей оцененных (ИСЗ CryoSat-2), рассчитанных (система PIOMAS) и измеренных («Трансарктика-2019») значений толщин льда и высот снега

Table 2

Параметр	Среднее, см	Среднее абсолютное, см	СКО, см	Минимум, см	Максимум, см
$SIT_c - SIT_c$	43,9	83,9	95,7	-217,8	225,4
$SIT_{co} - SIT_{c}$	30,4	73,8	95,0	-261,7	197,9
$SD_{c}^{\circ} - SD_{c}^{\circ}$	-3,6	10,0	12,1	-29,5	10,8
$SIT_{p} - SIT_{q}$	-14,0	63,6	80,5	-242,5	112,0
$SIT_{n36}^{P} - SIT_{n}$	-24,4	63,6	80,0	-254,8	100,9
$SD_{p}^{pso} = SD_{pso}^{r}$	-14,7	15,2	11,7	-38,3	4,8

Statistics of the differences between the observed (CryoSat-2), calculated (PIOMAS) and measured ("Transarktika-2019") sea ice thickness and snow height values

Система PIOMAS в среднем на 24 см (для интервальной толщины льда) занижает значения толщины льда при среднеквадратическом отклонении (СКО) 80 см и на 15 см занижает высоту снега при СКО 12 см.

Несмотря на значительные средние разности, оценки ИСЗ СгуоSat-2 в целом в 47 % случаев соответствовали измеренным значениям толщины льда против 29 % для системы PIOMAS. Аналогично оценки высоты снега для ИСЗ СгуоSat-2 соответствовали измерениям высоты снега в 47 % случаев против 27 % для системы PIOMAS. Характерные занижения интервала (масштаба) изменчивости рассчитанных толщин льда относительно измеренных или оцененных ИСЗ СгуоSat-2 хорошо иллюстрируются рис. 2. Так, рассчитанные значения *SIT* сконцентрированы в интервале 150...175 см против интервала 50...400 см для измеренных или оцененных. Анализ рис. 26 показывает, что коррекция оценок *SIT* для ИСЗ СгуоSat-2 путем замены климатических значений плотностей льда, снега и высоты снега на измеренные предсказуемо увеличивает интервал изменчивости и приближает его к наблюдениям *in situ*. Анализ гистограмм распределения для высот снега, представленных на рис. 3, показывает, что интервал изменчивости как рассчитанных, так и оцененных — по факту климатических — высот снега значимо меньше, чем у наблюдений *in situ* — 7...12 и 20...30 см против 5...45 см.

## АНОМАЛИЯ ИЗМЕРЕННЫХ ТОЛЩИН ЛЬДА И СНЕГА ПО ОТНОШЕНИЮ К РЕГИОНАЛЬНЫМ ФОНОВЫМ ЗНАЧЕНИЯМ

С климатической точки зрения представляет интерес сравнение измеренных значений толщин льда и высот снега с аналогичными наблюдениями прошлых десятилетий. В качестве первого периода использован интервал 2011 — 2019 гг. — период функционирования ИСЗ CryoSat-2. Обобщенные оценки ИСЗ CryoSat-2 на основе среднемесячных данных и данные расчетов системы PIOMAS на основе ежедневных полей распределения [9] для точек расположения гидрологических станций экспедиции и аналогичного сезонного интервала (апрель) представлены в табл. 3. Результаты расчетов показывают, что экспедиция ААНИИ фактически была проведена в один из наиболее благоприятных для ледовых исследований годов последнего десятилетия для данного региона — средняя толщина льда в апреле 2019 г. была на 15 — 28 см

#### Таблица 3

Статистические характеристики измеренных («Трансарктика-2019»), оцененных (ИСЗ CryoSat-2) и рассчитанных (система PIOMAS) значений толщин льда и высот снега на апрель 2019 г., 2011 — 2019 гг. и 2000 — 2010 гг.

Table 3

Statistics of the measured ("Transarktika-2019"), observed (CryoSat-2) and calculated (PIOMAS) sea ice and snow height values for April 2019, 2011 — 2019 and 2000 — 2010

	2019		2011 — 2019			2000 — 2010			
Параметр	Минимум, см	Максимум, см	Среднее, см	Минимум, см	Максимум, см	Среднее, см	Минмум, см	Максмум, см	Среднее, см
SIT <sub>o</sub>	63	>400	193	_	-	-	—	-	_
SD	0	70	24	_	_	_	_	-	_
SIT <sub>c</sub>	77	335	212	150	232	187	_	-	_
$SD_c$	17	25	18	18	23	20	_	_	_
$SIT_p$	169	195	179	155	173	162	159	191	173

выше таковой для интервала 2011 — 2019 гг. при несколько меньшей (1 — 2 см) высоте снежного покрова. Этот факт также хорошо иллюстрируется сравнением среднемесячных распределений толщин льда по ИСЗ СгуоSat-2 в апреле 2019, 2011 и 2013 гг., представленных на рис. 1 и 4. Аналогичное обобщение для второго периода — 2000 — 2010 гг. — на основе только данных расчетов системы PIOMAS, приведенное в табл. 3, показывает, что предыдущий период также характеризуется меньшими толщинами льда, хотя и не такими значительными (минус 4 см).



Рис. 4. Оценки толщины морского льда по ИСЗ CryoSat-2 в апреле 2011 г. (*a*) и апреле 2013 г. ( $\delta$ ) Fig. 4. CryoSat-2 estimates of sea ice thickness in April 2011 (*a*) and April 2013 ( $\delta$ )

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ \* 2020 \* 66 (3)

В.М. СМОЛЯНИЦКИЙ, А.Б. ТЮРЯКОВ и др.

V.M. SMOLYANITSKY, A.B. TURYAKOV et al.



Рис. 5. Средний возрастной состав морского льда в апреле за период 1972 — 1994 гг. на основе ледового картирования. Дополнительно нанесены точки посадки ВВЭ «Север» за 1955 — 1979 гг. и измеренные преобладающие в местах посадки толщины льда

Fig. 5. Mean stage of sea ice development for April 1972 — 1994 based on ice charting. Additionally, locations of the landing of high-Arctic "Sever" expedition during 1955 — 1979 and measured predominant sea ice thickness at points of landing are depicted

Можно ли сделать сравнение за более отдаленные периоды? Вопрос неоднозначный, если не привлекать данные численных расчетов. На рис. 5 представлено среднее распределение возрастного состава морского льда за период 1972 — 1994 гг., построенное на основе данных 7 — 10-дневного ледового картирования ААНИИ [12] и Национального ледового центра США [13].

Как видно из рисунка, в данный период район экспедиции «Трансарктика-2019» характеризовался значительно более толстыми льдами — по крайней мере двухлетним льдом с характерной толщиной ровного льда, в соответствии с «Номенклатурой ВМО по морскому льду» порядка 250 см, или на ~60 см больше, чем в апреле 2019 г. (табл. 3).

Привлечение аналогичных данных контактных измерений, выполненных в рамках Высокоширотных воздушных экспедиций (ВВЭ) «Север» [14, 15] за более ранний период 1950 — 1970-х гг., к сожалению, не дает ответа на поставленный вопрос. Обобщение 26 доступных за апрель 1955 — 1979 гг. данных преобладающих в точках посадки ВВЭ «Север» толщин льда (в рамках широтно-долготного прямоугольника 81 — 85°с.ш. 28 — 55° в.д.), представленных на рис. 5, дает среднюю толщину ровного льда 104 см при интервале 49...280 см, что существенно меньше, чем измерения экспедиции «Трансарктика-2019». Преобладающие высоты снега также меньше — среднее значение 10 см при интервале 2...40 см.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный сравнительный анализ показал существенно лучшее соответствие между изменчивостью измеренных (*in situ*) и оцененных по ИСЗ CryoSat-2 толщин льда, чем для измеренных и рассчитанных (по системе PIOMAS) параметров.

### ОКЕАНОЛОГИЯ

Полученные разности для толщин льда (+44/+96 см для CryoSat-2 без коррекции, +30/+95 см для CryoSat-2 с коррекцией, -14/+81 см для системы PIOMAS) и высот снега (-4/+12 см для CryoSat-2, -15/+12 см для системы PIOMAS) показывают масштабы неопределенности дистанционной оценки толщин морского льда и высот снега для районов преобладания средних и толстых однолетних льдов. Коррекция алгоритма расчета толщины льда для ИСЗ CryoSat-2 путем замены климатических значений плотностей льда, снега и высот снега на данные прямых измерений предсказуемо повышает качество расчетов толщины льда по наблюдениям ИСЗ (в среднем на 10 см). Таким образом, погрешность данных оценок ИСЗ CryoSat-2, равно как и других новых систем альтиметрии льда, например IceSat-2, будет в значительной степени, а возможно, и в первую очередь зависеть от точности представления параметров снежного покрова — его высоты и плотности и плотности льда.

Сравнение выполненных измерений с наблюдениями и данными расчетов прошлых десятилетий показывает, что экспедиция «Трансарктика-2019» проведена в один из наиболее благоприятных для ледовых исследований годов после 2000 г. с фоновым увеличением в апреле 2019 г. толщин льда в точках гидрологических станций на 5 — 28 см. Вместе с тем исторические данные ледового картирования указывают на общее уменьшение толщин льда по району работ экспедиции относительно периода 1970 — 1990-х гг. Использование аналогичных более ранних контактных измерений ВВЭ «Север» 1950 — 1970-х годов не дает однозначного ответа о наблюденной аномалии толщин льда.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность С.М. Ковалеву и всему ледоисследовательскому отряду экспедиции «Трансарктика-2019» за предоставленные данные по морфометрическим параметрам морского льда. Обработка данных CryoSat-2 (толщина льда, превышения льда) финансируется Министерством экономики и энергетики Германии (грант: 50EE1008), для получения данных за период 01.04.2011 — 03.05.2019 использован портал данных https://www.meereisportal.de (грант: REKLIM-2013-04).

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-60048.

Acknowledgments. The authors wish to express their thanks to Sergey Kovalev and the ice research team of the "Transarktika-2019" expedition for the data on the morphometric parameters of sea ice. Processing of the CryoSat-2 (sea ice thickness, freeboard) is funded by the German Ministry of Economics Affairs and Energy (grant: 50EE1008) and data from 20110401 to 20190503 obtained from https://www.meereisportal. de (grant: REKLIM-2013-04).

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This work was funded by the RFBR grant № 18-05-60048.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов И.Е., Иванов В.В., Фильчук К.В., Макштас А.П., Кустов В.Ю., Махотина И.А., Иванов Б.В., Уразгильдеева А.В., Сёмин В.Л., Зимина О.Л., Крылов А.А., Богин В.А., Захаров В.Ю., Малышев С.А., Гусев Е.А., Барышев П.Е., Пильгаев С.В., Ковалев С.М., Тюряков А.Б. Трансарктика-2019: зимняя экспедиция в Северный Ледовитый океан на НЭС «Академик Трёшников» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65 (3). С. 255 — 274.

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ \* 2020 \* 66 (3)

346

В.М. СМОЛЯНИЦКИЙ, А.Б. ТЮРЯКОВ и др.

V.M. SMOLYANITSKY, A.B. TURYAKOV et al.

2. Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta S., Derksen C., Ekaykin A., Hollowed A., Kofinas G., Mackintosh A., Melbourne-Thomas J., Muelbert M.M.C., Ottersen G., Pritchard H., Schuur E.A.G. Polar Regions. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte Zhai V., P., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B., Weyer N.M. (eds.)]. URL: https://www.ipcc. ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/07 SROCC Ch03 FINAL.pdf (дата обращения 01.09.2020).

3. Ivanova N., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjær G., Brucker L., Shokr M. Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 1797 — 1817.

4. *Liu Y., Key J., Wang X., Tschudi M.* Multidecadal Arctic sea ice thickness and volume derived from ice age // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 1325 — 1345.

5. Systematic observation requirements for satellite-based data products for climate (2011 update). GCOS — 54. Geneve, GCOS Secretariat, 2011. P. 127.

6. Laxon S.W., Giles K.A., Ridout A.L., Wingham D.J., Willatt R., Cullen R., Kwok R., Schweiger A., Zhang J., Haas C. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 732 — 737.

7. Ricker R.; Hendricks S., Helm V., Skourup H., Davidson M. Sensitivity of CryoSat-2 Arctic sea-ice freeboard and thickness on radar-waveform interpretation // The Cryosphere. 2014. V. 8 (4). P. 1607 — 1622.

8. *Hendricks, S., Ricker, R.* Product User Guide & Algorithm Specification — AWI CryoSat-2 Sea Ice Thickness version 2.2. AWI. 2019. P. 54.

9. *Zhang J., Rothrock D.A.* Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates // Mon. Weather Rev. 2003. V. 131. P. 845 — 861.

10. *Zhang J., Rothrock D.* A Thickness and Enthalpy Distribution Sea-Ice Model // J. Phys. Ocean. 2001. V. 31. P. 2986 — 3001.

11. Бузуев А.Я., Дубовцев В.Ф., Захаров В.Ф., Смирнов В.И. Условия плавания судов во льдах морей Северного полушария. М.: Изд-во ГУНИО МО СССР, 1988. 280 с.

12. Комплексные ледовые карты ФГБУ «ААНИИ» Северного Ледовитого океана за 1933 — 1992 гг. в обменном формате ВМО СИГРИД // Мировой центр данных по морскому льду — Глобальный банк данных по морскому льду. URL: http://wdc.aari.ru/datasets/d0001/north/aari (дата обращения 01.09.2020).

13. Комплексные ледовые карты Северной полярной области Национального ледового центра США за 1972 — 1994 гг. в обменном формате ВМО СИГРИД // Мировой центр данных по морскому льду — Глобальный банк данных по морскому льду. URL: http://wdc.aari.ru/datasets/ d0001/north/nic/sigrid (дата обращения 01.09.2020).

14. *Грачев К.И., Константинов Ю.Б.* Высокоширотные воздушные экспедиции «Север» / Под ред. В.Т. Соколова. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 176 с.

15. *Romanov I.P.* Morphometric Characteristics of Ice and Snow in the Arctic Basin: Aircraft Landing Observations from the Former Soviet Union, 1928 — 1989, Version 1. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: 10.7265/N5B8562T.

### REFERENCES

1. Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyakov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V "Akademik Tryoshnikov". Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (3): 255 — 274. [In Russian].

### ОКЕАНОЛОГИЯ

2. Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta S., Derksen C., Ekaykin A., Hollowed A., Kofinas G., Mackintosh A., Melbourne-Thomas J., Muelbert M.M.C., Ottersen G., Pritchard H., Schuur E.A.G. Polar Regions. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte Zhai V., P., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B., Weyer N.M. (eds.)]. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/07\_SROCC\_Ch03\_FINAL.pdf (accessed 01.09.2020).

3. Ivanova N., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjær G., Brucker L., Shokr M. Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations. The Cryosphere. 2015, 9: 1797 — 1817.

4. *Liu Y., Key J., Wang X., Tschudi M.* Multidecadal Arctic sea ice thickness and volume derived from ice age. The Cryosphere. 2020, 14: 1325 — 1345.

5. Systematic observation requirements for satellite-based data products for climate (2011 update). GCOS — 154. Geneve, GCOS Secretariat, 2011: 127.

6. Laxon S.W., Giles K.A., Ridout A.L., Wingham D.J., Willatt R., Cullen R., Kwok R., Schweiger A., Zhang J., Haas C. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume. Geophys. Res. Lett. 2013, 40: 732 — 737.

7. *Ricker R.; Hendricks S., Helm V., Skourup H., Davidson M.* Sensitivity of CryoSat-2 Arctic sea-ice freeboard and thickness on radar-waveform interpretation. The Cryosphere. 2014, 8 (4): 1607 — 1622.

8. *Hendricks S., Ricker R.* Product User Guide & Algorithm Specification — AWI CryoSat-2 Sea Ice Thickness version 2.2. AWI. 2019: 54.

9. *Zhang J., Rothrock D.A.* Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates. Mon. Weather Rev. 2003, 131: 845–861.

10. *Zhang J., Rothrock D.* A Thickness and Enthalpy Distribution Sea-Ice Model. J. Phys. Ocean. 2001, 31: 2986 — 3001.

11. Buzuev A.Ya., Dubovtsev V.F., Zakharov V.F., Smirnov V.I. Usloviya plavaniya sudov vo l'dakh morei severnogo polushariya. Navigation conditions in the sea of the Northern Hemisphere. Moscow: GUNIO MO USSR, 1988: 280 p. [In Russian].

12. Historical collection of the Arctic and Antarctic Research Institute detailed ice charts of the Arctic Ocean for 1933—1992 in the WMO SIGRID exchange format. World Data Center Sea-Ice — Global Digital Sea Ice Data Bank. Available at: http://wdc.aari.ru/datasets/d0001/north/aari (accessed 01.09.2020).

13. Historical collection of the US National Ice Center Northern Hemisphere detailed ice charts for 1972—1994 in the WMO SIGRID exchange format // World Data Center Sea-Ice — Global Digital Sea Ice Data Bank. Available at: http://wdc.aari.ru/datasets/d0001/north/nic/sigrid (accessed 01.09.2020).

14. *Grachev K.I., Konstantinov Yu.B., Vysokoshirotnie vozdushnie ekspeditsii Sever.* High-latitude aircraft expeditions "Sever". St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2000: 176 p. [In Russian].

15. *Romanov I.P.* Morphometric Characteristics of Ice and Snow in the Arctic Basin: Aircraft Landing Observations from the Former Soviet Union, 1928—1989, Version 1. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: 10.7265/N5B8562T