

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 532.322

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-351-364

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СТРОЕНИЯ РОВНОГО ПРИПАЙНОГО ЛЬДА В РАЙОНЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТАЦИОНАРА «ЛЕДОВАЯ БАЗА “МЫС БАРАНОВА”»

В.А. БОРОДКИН, С.М. КОВАЛЕВ, А.И. ШУШЛЕБИН*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

**skovalev@aari.ru*

SPATIAL HETEROGENEITY IN THE STRUCTURE FAST ICE OF LEVEL IN THE AREA OF THE RESEARCH STATION «ICE BASE CAPE OF BARANOV».

V.A. BORODKIN, S.M. KOVALEV, A.I. SHUSHLEBIN*

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

**skovalev@aari.ru*

Received September, 7, 2018

Accepted November, 30, 2018

Keywords: fast ice, salinity, temperature, texture, thermic metamorphism.

Summary

Two ice coring transects in the Shokalsky Strait were made in order to analyze a spatial heterogeneity in the structure of fast ice in the area of the research station “Ice base Cape of Baranov”. The first transect was 16 km long made off the shore of Bolshevik Island in a western direction across the Shokalsky Strait. The second transect was made along the eastern shore of the Shokalsky Strait. Structural analysis of the recovered sea ice cores shows that fast ice in the Shokalsky Strait features a complicated multilayer structure formed of congelation ice, congelation-frazil ice, frazil slush, and infiltration formations. Various conditions of ice formation form the ices of various genetic types. In terms of ice thickness, a sequence of layer occurrence and type, all level fast ice of the Shokalsky Strait in the area of the station can be divided into three main groups. The group I, being the most common one, is the ice group formed directly in the strait, approximately outside the 100 m isobath. Its structure comprises three to four layers. The average ice thickness measured in the end of May was 132 cm. A distinctive feature of the ice belonging to (or associated with) this group is the presence of a distinct lamination in the texture pattern for almost all recovered ice cores.

Citation: *Borodkin V.A., Kovalev S.M., Shushlebin A.I. Spatial heterogeneity in the structure fast ice of level in the area of the research station “Ice base Cape of Baranov”. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 351–364. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-351-364*

The ice of this group also has an increased salinity compared to the ice of other groups, especially in the upper layers.

The ice of the group II prevails, mainly in closed bays or gulfs. This group ice forms in dynamically stable conditions. Formation of fast ice in these regions of the study area began some earlier than in other locations, and the thickness of this ice reached 160 cm or more.

The ice of the group III is transitional from the group II to the group I. Its distinctive feature is the presence of a thick layer of rafting ice. The main place of its formation is the boundary of separation of fast ice with drifting ice or open water.

In the Shokalsky Strait, in the bays and in the coastal regions, there was observed the spatial ordering of the columnar ice crystals. This feature was especially pronounced in level fast ice from the open part of the strait.

Поступила 7 сентября 2018 г.

Принята к печати 30 ноября 2018 г.

Ключевые слова: припай, соленость, текстура, температура, термометаморфизм.

Для анализа пространственной неоднородности строения припайного льда в проливе Шокальского было сделано два ледовых разреза. Первый разрез был выполнен от берега в западном направлении поперек пролива Шокальского. Второй разрез был проложен вдоль восточного берега пролива Шокальского. Анализ показал, что весь ровный припайный лед пролива Шокальского в районе базы можно разделить на три основные группы. К первой, самой распространенной группе (группа I) относится лед, образовавшийся непосредственно в проливе, примерно за пределами 100-метровой изобаты. Льды второй группы (группа II) преобладают главным образом в закрытых бухтах или заливах, их нарастание проходило в динамически стабильных условиях. Лед группы III является переходным от группы II к группе I. В проливе Шокальского, в бухтах и в прибрежных районах наблюдалась пространственная упорядоченность волокнистых кристаллов. Описаны процессы образования и взлома припая.

ВВЕДЕНИЕ

В 2013 г. на о. Большевик арх. Северная Земля возобновил постоянную работу научно-исследовательский стационар (НИС) «Ледовая база “Мыс Баранова”». С этого времени появилась возможность проводить регулярные комплексные исследования состояния морского снежно-ледяного покрова и материкового льда западной части моря Лаптевых. Первые такие наблюдения были проведены в весенне-летний период 2014 г. Основными задачами изучения пространственной неоднородности строения ледяного покрова в районе НИС являлись: получение сведений о строении и физических свойствах припайного однолетнего льда, изучение процессов метаморфизма в однолетнем припайном льду в весенне-летний период.

Работы выполнялись на прилегающей к НИС акватории. В рамках поставленных задач было выполнено два ледовых разреза (один от НИС до середины пролива Шокальского и второй вдоль восточного берега бухты Амба) и проведены исследования в южной части залива Микояна.

Полученные результаты исследования припая пролива Шокальского в 2014 г. должны лечь в основу дальнейших работ, направленных на изучение процессов формирования ровного льда и его физических свойств при различных условиях ледообразования, в которых значимую роль станет играть строение льда.

МЕТОДИКА РАБОТ

Для исследования пространственной неоднородности строения припайного льда в проливе Шокальского в период с 17 мая по 11 июня 2014 г. было выполнено два ледовых разреза, на которых отобрано семь кернов для текстурно-структурного

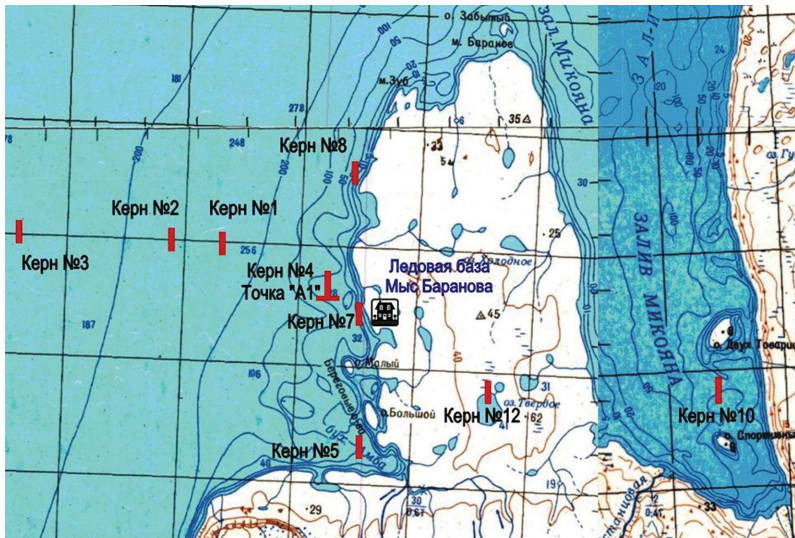


Рис. 1. Схема мест взятия образцов льда весной 2014 г. и преобладающие направления главной оптической оси волокнистых кристаллов.

1 — «Ледовая база «Мыс Баранова»»; 2 — места отбора кернов; 3 — преобладающее направление главной оптической оси волокнистых кристаллов; 4 — дополнительное направление главной оптической оси волокнистых кристаллов

Fig. 1. Map of the study area in the eastern Shokalsky Strait showing the locations of the coring sites in spring — summer 2014 and predominant orientation of main optical axes of ice crystals from core segments associated with columnar ice.

1 — «Ice base Cape of Baranov»; 2 — places for taking ice samples; 3 — predominant direction of the fibrous crystals main optical axis; 4 — additional direction of the fibrous crystals main optical axis

анализа и определения некоторых физических свойств льда (рис. 1). Еще один керн отобран 16 июня в заливе Микояна.

Первый разрез длиной 16 км был выполнен от берега в районе базы в западном направлении поперек пролива Шокальского. Он содержал 4 точки (керны № 1, № 2, № 3 и № 4). Второй разрез был проложен вдоль восточного берега пролива Шокальского. Целью разреза было выявление различия в строении льда на наиболее характерных участках ледяного покрова. В него вошли керны № 5 в бухте Амба, № 7 у берега в районе базы и № 8 у берега в 2 км к северу от базы. В этот же разрез вошел керн № 4, взятый на точке (рис. 1), где проводились наблюдения за временной изменчивостью строения ледяного покрова. Таким образом, эта точка объединяет оба ледовых разреза и наблюдения за временной изменчивостью состояния ровного припайного льда.

Для отбора образцов выбиралось место с неповрежденным снежным покровом [1]. Температура льда определялась датчиком GTN 175/Pt. Для защиты льда от воздействий солнечной радиации использовался светоотражающий тубус. Соленость льда определялась по электропроводности талой воды кондуктометром Hunna.

Текстурно-структурный анализ проводился в холодной ледовой лаборатории [2]. Из ледяных кернов выпиливались вертикальные пластины высотой 20–22 см, шириной 15 см и толщиной 2 см. Стыковка полученных пластин между собой позволяла получить полный вертикальный срез керна на всю его толщину.

Для структурного анализа из выбранных слоев изготавливались пластины толщиной менее 1 мм, которые помещались между двумя поляризационными стеклами и освещались снизу электрическими лампами. Полученное изображение кристаллов льда описывалось и фотографировалось.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Становление припая в районе базы началось в первой декаде октября 2013 г. Первым в относительно спокойных условиях сформировался лед в юго-восточной части бухты Амба. Затем в условиях торошения и наслоения молодых льдов толщиной до 10 см припай установился вдоль берега и на большей части бухты Амба. Образовавшийся припай ограничивался со стороны пролива Шокальского айсбергами, севшими на грунт, границей местоположения которых можно считать 100-метровую изобату. Дальнейшее распространение границы неподвижного льда в сторону пролива проходило в условиях динамической неустойчивости, сопровождалось торошением и наслоением молодых льдов. Исследование выступающей части торосов показало, что наблюдалось не менее двух торошений с толщинами льда 15–20 см и 25–35 см, создавших гряды торосов вдоль берега. Становление припая в центральной части пролива Шокальского произошло в третьей декаде ноября.

Анализ отобранных кернов показал, что лед пролива Шокальского представляет собой сложную многослойную систему, в формировании которой принимали участие льды конжеляционного, конжеляционно-внутриводного, внутриводно-шугового и инфильтрационного образования. Они формируют льды различных генетических типов [3]. По толщине, последовательности залегания слоев и типу весь ровный

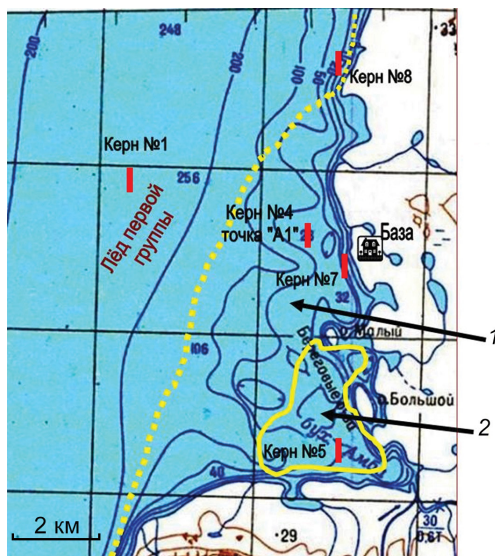


Рис. 2. Схема районирования морского ровного припайного льда по доминирующей группе в восточной части пролива Шокальского летом 2014 г.

1 — лед группы III, 2 — лед группы II

Fig. 2. Map of the study area in the eastern Shokalsky Strait showing the coring sites and three identified zones (groups) of level fast ice in spring-summer of 2014.

1 — ice of the group III, 2 — ice of the group II

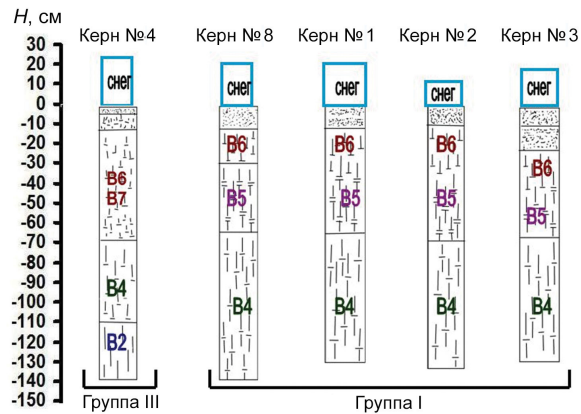


Рис. 3. Схема строения льда на ледовом разрезе через пролив Шокальского, лето 2014 г.

Fig. 3. Vertical structure of level fast ice as inferred from the analysis of sea ice cores recovered of ice structure from the transect across the Shokalsky Strait, summer 2014

припайный лед пролива Шокальского в районе базы можно разделить на три основные группы. К первой, самой распространенной группе (группа I) относится лед, образовавшийся непосредственно в проливе, примерно за пределами 100-метровой изобаты (рис. 2). Его строение можно охарактеризовать как трех-четырёхслойную систему (керны № 1, № 2 и № 3) (рис. 3). Средняя толщина льда в конце мая составила 132 см. Верхние 5–20 см сформированы мелкозернистыми кристаллами снежно-водного, внутриводного или шугового льда (В8, В7). Нижележащие слои сложены льдом типа В6 с чередованием изометрических и шестоватых кристаллов, с последующим формированием льда волокнистых структур типа В5, имеющего большое количество включений кристаллов внутриводного льда. Такое строение льда указывает на наличие сильных течений и открытой воды в виде разводий или заприпайных полыней в период нарастания льда (рис. 4).

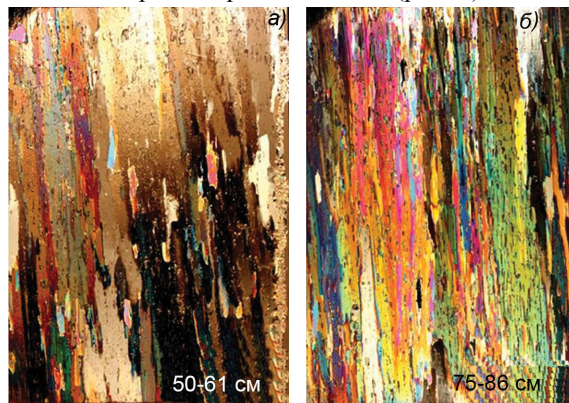


Рис. 4. Фотографии вертикальных срезов средних слоев льда пролива Шокальского, керн № 1. а — слой 50–61 см, лед типа В5; б — слой 75–86 см, лед типа В4. Глубины слоев отсчитываются от верхней поверхности льда

Fig. 4. Photographs of vertical ice core thin sections of the middle layers of sea ice Core № 1 from the Shokalsky Strait.

а — layer 50–61 cm, ice type В5; б — layer 75–86 cm, ice type В4. Depths indicate from the top of the ice core

Нижний слой сложен льдом типа В4, состоящим из волокнистых кристаллов с меньшим количеством включений внутриводного льда, чем у льда типа В5. Этот лед вырос уже после полного становления припая. В процентном отношении лед зернистой структуры верхних слоев на конец мая занимал не более 15 % от общей толщины льда. Последующие слои имеют волокнистую структуру (85 %), с обязательным присутствием большего или меньшего количества включений кристаллов внутриводного льда, что указывает на динамичность условий ледообразования. Одной из отличительных особенностей льда группы I является наличие мощной слоистости в текстурном рисунке практически для всего льда (рис. 5). Льды этой группы образованы в более поздние сроки, чем льды других групп, когда температура воздуха заметно понижается, а скорость роста кристаллов льда возрастает. С этим связана повышенная соленость льда по сравнению со льдами других групп, особенно в верхних (0–60 см) слоях (рис. 6). Средние и нижние слои льда имеют пространственную упорядоченность волокнистых кристаллов, что вызывает пространственную анизотропию некоторых физических свойств ледяного покрова в проливе. Структурные и текстурные особенности строения льда этой группы показывают, что на строение льда серьезное влияние оказывало присутствие постоянных течений, разводий или польней.

По строению и физическим свойствам ко льдам группы I следует отнести и лед керна № 8, взятый в 2 км к северу от базы и в 200 м от берега. Несмотря на поздние сроки отбора керна (11 июня), средняя соленость льда продолжала оставаться высокой по сравнению со средней соленостью льда на контрольной точке «А1» (см. рис. 2 и таблицу). Эти факторы указывают на то, что становление припая в этом районе происходило позднее, чем в районе бухты Амба и точки «А1». Сроки становления припая в этой части побережья близки к срокам становления припая в центральной части пролива.

Льды группы II преобладают главным образом в закрытых бухтах или заливах, их нарастание проходило в динамически стабильных условиях. Становление припая на этих участках акватории начиналось несколько раньше, чем в других местах, и толщина этого льда достигает 160 и более сантиметров. Верхний слой до 30 см, как и у льдов группы I, сложен из зернистых кристаллов различных типов конгеляционного ледообразования (В8, В7, В6), ниже которого нарастает лед волокнистых

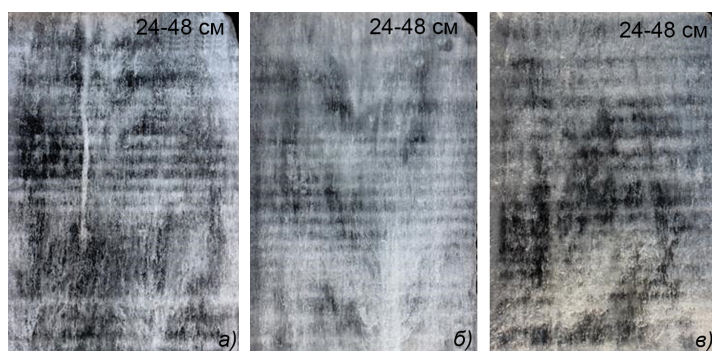


Рис. 5. Фотографии вертикальных срезов слоя 24–48 см льда пролива Шокальского.
а — керн № 1 (17.05.2014); б — керн № 2 (19.05.2014); в — керн № 3 (20.05.2014)

Fig. 5. Photographs of vertical ice core thick sections of the ice layer 24–48 cm from the Shokalsky Strait.
а — core № 1 (17.05.2014); б — core № 2 (19.05.2014); в — core № 3 (20.05.2014)

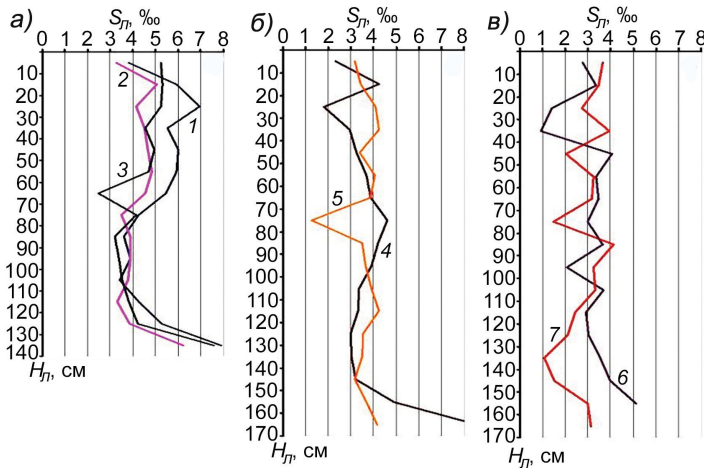


Рис. 6. Распределение солености (S_p) по толщине льда ($H_л$) в группах I (а), II (б) и III (в).
 1 — керн № 1; 2 — керн № 2; 3 — керн № 3; 4 — керн № 5; 5 — керн № 10; 6 — керн № 6; 7 — керн № 7

Fig. 6. Vertical salinity profiles in the analysed ice cores for group I (a), II (б) and III (в).

1 — core № 1; 2 — core № 2; 3 — core № 3; 4 — core № 5; 5 — core № 10; 6 — core № 6; 7 — core № 7

Таблица

Некоторые характеристики припайного льда на ледовых разрезах

Керн	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 7	№ 8	№ 10
Группа	I	I	I	III	II	III	I	II
Дата	17 V	19 V	20 V	23 V	27 V	8 VI	11 VI	16 VI
$H_{сн}$, см	20	9	15	27	11	50	20	28
$H_л$, см	130	136	130	142	160	168	140	168
ΔH , см	9	4	3	4	12	0	1	6
$T_л$, °C, средняя	-3,6	-3,6	-3,9	-2,8	-2,4	-2,3	-2,2	-2,2
$T_л$, °C, минимальная	-4,7	-4,9	-5,54	-4,2	-2,8	-2,5	-2,6	-2,6
$T_{возд}$, °C	-6,2	-3,8	-9,8	-2,6	2,0	-0,9	-2,7	-3,9
$T_{снег/лед}$, °C	-4,2	-2,4	-1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$S_{л}$, ‰, средняя	5,16	4,45	4,45	3,13	3,80	2,80	4,48	3,64
$S_{л}$, ‰, максимальная	7,89	7,23	7,56	3,73	8,61	4,12	7,85	4,53
$S_{л}$, ‰, поверхность	3,83	3,27	5,25	2,60	2,30	3,65	4,31	3,18

Примечание: $H_{сн}$ — толщина снега, $H_л$ — толщина льда, ΔH — превышение льда, $T_{возд}$ — температура воздуха, $T_л$ — температура льда, $T_{снег/лед}$ — температура границы снег/лед, $S_л$ — соленость льда.

структур (рис. 7). В отличие от льдов группы I рост волокнистых кристаллов происходит в более статических условиях, без поступления кристаллов внутриводного льда к фронту кристаллизации, в результате чего формируется лед типа В2 (рис. 8).

Ко льдам группы II относится лед юго-восточной части бухты Амба (керн № 5) и лед южной части залива Микояна (керн № 10). Текстурированный рисунок этого льда (рис. 8) легко различается по капиллярным порам, состоящим из вертикально расположенных между волокнами кристаллов цепочек мельчайших пузырьков, иногда соединенных между собой в трубчатую систему. Распределение солености по толщине у льдов этой группы более сглажено. Волокнистая текстура способствует

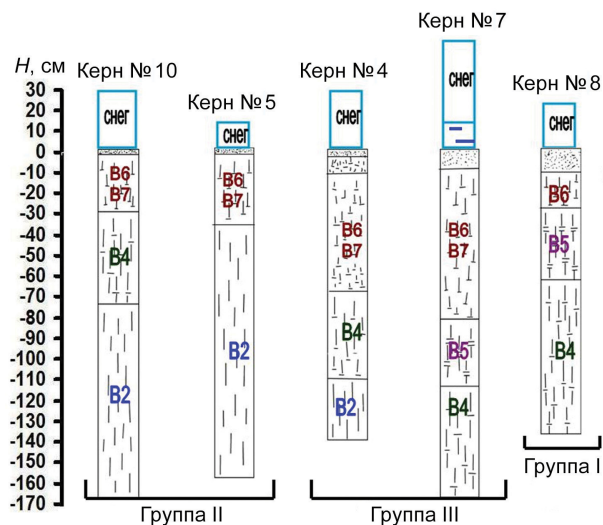


Рис. 7. Схема строения льда на ледовом разрезе вдоль восточного берега пролива Шокальского, лето 2014 г.

Fig. 7. Scheme of the ice structure on the ice cut along the eastern shore of the Shokalsky Strait, summer 2014

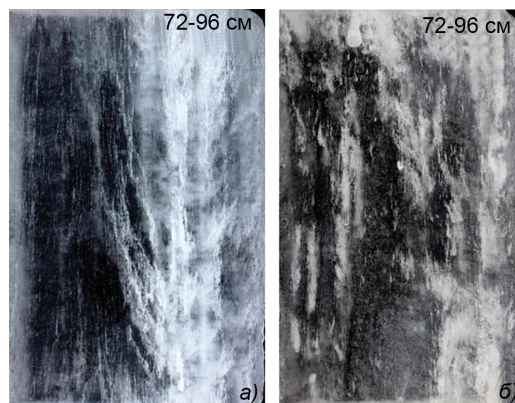


Рис. 8. Фотографии вертикальных срезов слоя 72–96 см льда: а — керн № 5 в бухте Амба; б — керн № 10 в заливе Микояна, июнь 2014 г.

Fig. 8. Photographs of vertical sections of the ice layer 72–96 cm: а — core № 5 in the Amba Bay; б — core № 10 in Mikoyan Bay, June 2014

более легкому образованию стоковых каналцев по системе трубчатых включений, и соленость льда быстро выравнивается по толщине. Меньшее количество участков выклинивания и фронтального прерывания роста волокнистых кристаллов приводит к быстрому объединению отдельных стоковых каналцев и формированию стоковых русел, пронизывающих толщу льда с верхних слоев до самого низа. Соотношение льда зернистой и волокнистой структуры примерно то же, что и у льдов группы I (20 % и 80 %), но средние и нижние слои льда представлены в основном льдами типа B2, в отличие от группы I, где преобладают льды типа B5 и B4.

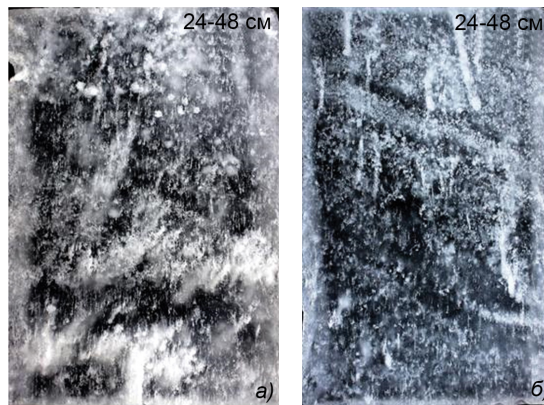


Рис. 9. Фотографии вертикальных срезов слоя 24–48 см льда у восточного берега пролива Шокальского: *а* — керн № 7, 8.06.2014; *б* — керн № 9 (рядом с керном № 4), 12.06.2014

Fig. 9. Photographs of vertical thick sections of the ice layer 24–48 cm near the eastern shore of the Shokalsky Strait: *a* — core № 7, 8.06.2014; *b* — core № 9 (close to the core № 4), 12.06.2014

Лед группы III является переходным от группы II к группе I. Его отличительной особенностью является наличие мощного слоя набивного льда. Основное место его образования — граница разделения припайного льда с дрейфующим льдом или с открытой водой. В условиях динамической нестабильности ледообразования под кромку припая набиваются продукты механического разрушения льда в виде отдельных обломков или ледяной крошки, а также кристаллы внутриводного и шугового льда. Могут происходить наслоение или торшение льда с изменением горизонтального расположения отдельных кусков. В результате под верхней кромкой припая образуется слой, состоящий из зернистых изометрических кристаллов различного размера и формы (рис. 9). Лед типа В7, В6.

Величина этого слоя может колебаться в широких пределах от нескольких сантиметров до метра и зависит от интенсивности динамических процессов, сопровождающих его образование. В той или иной мере такой слой может встречаться в группах I или II, но его толщина редко бывает значительной. Условно границей перехода от одной группы к другой принята толщина слоя набивного льда в 40 см. Лед группы III представлен керном № 7 и кернами, взятыми в точке «А1». После стабилизации условий ледообразования под слоем набивного льда образуется лед волокнистых структур В5, В4 или В2 в зависимости от интенсивности поступления кристаллов внутриводного льда к фронту кристаллизации. В точке «А1» и в керне № 7 величина слоя набивного льда составляет 40 % от общей толщины льда на момент отбора кернов, и 60 % составляют нижележащие слои волокнистой структуры. Распределение солёности по толщине во льдах группы III отличается большей неоднородностью, чем во льдах других групп. В акватории станции лед этой группы охватывает большую часть бухты Амба и широкий (до 2–3 км) участок вдоль всего побережья.

В местах повышенного снегонакопления независимо от принадлежности к той или иной группе в результате проседания льда и выступания морской воды на поверхность образуется слой инфильтрационного льда (лед типа В9) (рис. 10).

Особенно интенсивно инфильтрационный лед образуется вдоль берегов, где наблюдаются надувы снега толщиной до нескольких метров. Ширина полосы вдоль

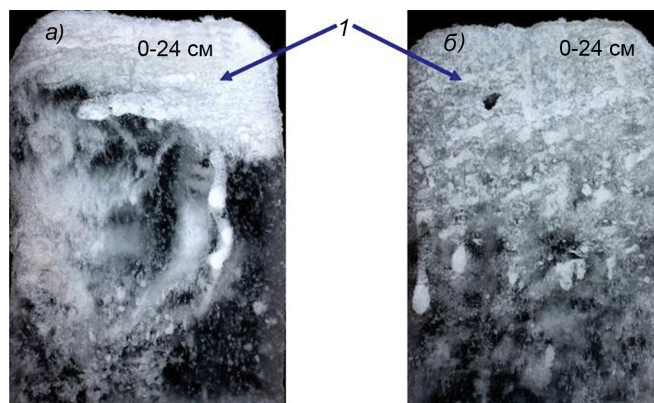


Рис. 10. Фотографии вертикальных срезов слоя 0–24 см льда со слоями инфильтрационного льда типа В9 (1) в проливе Шокальского, июнь 2014 г.: а — керн № 7, 8.06.2014; б — керн № 8, 11.06.2014

Fig. 10. Photographs of vertical thick sections of the ice layer 0–24 cm with layers of infiltration ice В9 (1) in the Shokalsky Strait, June 2014: а — core № 7, 8.06.2014; б — core № 8, 11.06.2014

берега, где было зафиксировано инфильтрационное ледообразование вблизи станции, достигает 200 м. Инфильтрационный лед образуется вблизи айсбергов и торосов, где создаются благоприятные условия для аккумуляции снега. Этот лед легко распознать по белому цвету и большому количеству пузыристых включений различной величины, зачастую создающих слоистую текстуру (лед типа В9). Во второй половине июня практически на всей акватории, где сохранялся снежный покров, происходило образование пресного или распресненного слоя инфильтрационного льда за счет режеляционной перекристаллизации нижних слоев снега (лед типа А9). Толщина этого слоя в районе точки «А1» не превышала 10 см.

С конца третьей декады июня в бухте Амба и вдоль берегов началось нарастание пресного или распресненного льда снизу в виде набора слоев различной толщины и плотности, состоящих из пластинчатых и шуговых кристаллов.

В проливе Шокальского, в бухтах и в прибрежных районах наблюдалась пространственная упорядоченность волокнистых кристаллов. Особенно четко она прослеживалась в открытой части пролива [4]. Анализ расположения кристаллов в горизонтальном шлифе керна № 1 с толщины 75 см показал высокую степень однородности положения главной оптической оси кристаллов (С-оси) ориентированной, с учетом магнитного склонения, по направлению ССВ–ЮЮЗ (рис. 11).

Поскольку пространственная упорядоченность кристаллов волокнистых структур обусловлена наличием постоянных течений [5, 6], то анализ преобладающего направления С-оси кристаллов позволяет установить наличие или отсутствие устойчивых подледных потоков и получить их направление (рис. 1).

Результаты структурного анализа горизонтальных шлифов льда, взятого в проливе Шокальского в шести километрах от станции (керн № 1), показывают, что подледные потоки в этом месте устойчивые, и имеют направленность ССВ–ЮЮЗ. В районе контрольной точки «А1» сохраняется направление ССВ–ЮЮЗ, которому соответствуют 51 % кристаллов в горизонтальном срезе, но появляются два новых направления: ЗСЗ–ВЮВ (33 %) и ССЗ–ЮЮВ (16 %). В районе взятия керна № 8 основные направления подледных течений ВСВ–ЗЮЗ и В–З. На направление

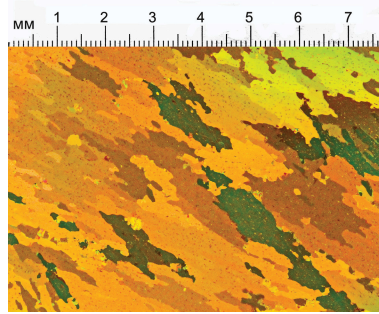


Рис. 11. Пространственная упорядоченность волокнистых кристаллов в керне № 1 на горизонте 75 см, 17.05.2014

Fig. 11. Spatial ordering of fibrous crystals in core № 1 at 75 cm depth, 17.05.2014

подледного потока в этом районе оказала влияние галечная коса, вытянутая в пролив южнее места отбора керна и отгораживающая небольшую бухту с севера.

В юго-восточной части бухты Амба, которая представляет собой сужающийся к устью реки Амба небольшой залив, основным оказалось направление С–Ю (50 %) и два дополнительных направления: СВ–ЮЗ (40 %) и З–В (10 %). В южной части залива Микояна преобладающим направлением стало ССЗ–ЮЮВ (50 %), совпадающее с вытянутостью залива, а дополнительное направление СЗ–ЮВ (20 %) имеет место из-за небольшого острова Спортивный, расположенного южнее точки отбора керна.

Торосообразование в районе «Ледовой базы «Мыс Баранова»» началось сразу же после начала становления припая. Лед в большей части бухты Амба и полоса льда вдоль восточного берега пролива Шокальского шириной от 0,5 до 1,5 км подверглись торошению при толщине льда 10–15 см. Позднее прошла вторая волна торошения, в виде отдельных полос различной ширины с генеральным направлением ССВ–ЮЮЗ с толщиной блоков льда в торосах 20–30 см, граница которой в сторону бухты Амба ограничивалась примерно 50-метровой изобатой. Несколько мористее этой полосы были обнаружены торосы с толщиной блоков льда 30–35 см. Граница их распространения немного выходила за внешнюю границу расположения айсбергов. Исключение составил мыс Визе, где расстояние между торосами, сложенными льдами разной толщины, оказалось минимальным и ограничивалось несколькими десятками метров. В глубине бухты Амба от устья в сторону пролива Шокальского на расстоянии 1–1,5 км признаков интенсивного торошения не обнаружено. Возможно, толща снега скрыла следы торошения на ранней стадии становления припая. Анализ строения керна льда, взятого на этом участке, показывает, что наслоение и торошение молодых льдов толщиной до 10 см могло иметь место.

Взлом припая в проливе Шокальского проходил поэтапно.

В последней декаде июня на льду появились первые снежицы. Заприпайная полынья проходила на 2–3 км севернее мыса Баранова. Было выявлено образование инфильтрационного пресного льда на границе снег–лед.

29 июня – 1 июля начался интенсивный сток пресных вод суши, зафиксировано начало нарастания льда летнего образования снизу.

В середине июля припай взломало в западной части пролива Шокальского. Граница взлома прошла севернее мыса Баранова на юго-запад до фьорда Марата.

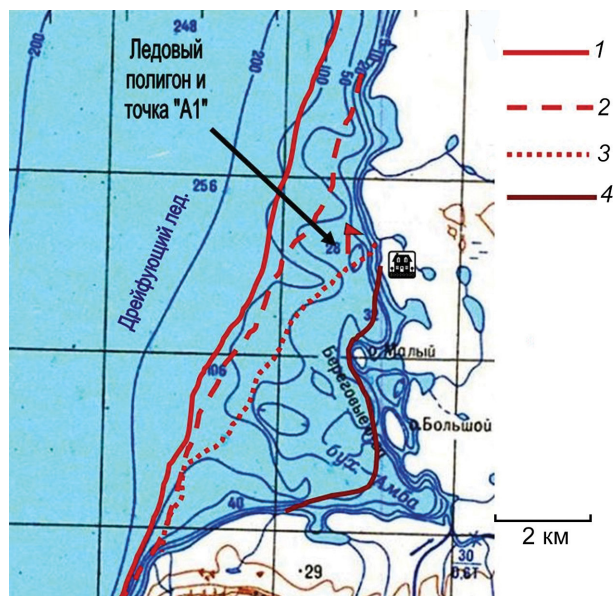


Рис. 12. Схема положения кромки припая перед его разрушением в районе «Ледовой базы «Мыс Баранова»»: 1 — 30.07.2014, 2 — 4.08.2014, 3 — 7.08.2014, 4 — 9.08.2014

Fig. 12. Changes in fast ice edge position during summer break up Scheme of the position of the fast ice edge before its destruction in the area of the “Ice Base Cape of Baranov”: 1 — 30.07.2014, 2 — 4.08.2014, 3 — 7.08.2014, 4 — 9.08.2014

В конце июля припай в большей части пролива Шокальского взломало. Граница взлома прошла от мыса Баранова вдоль берега на расстоянии 2–5 км (рис. 12). Положение кромки припая определялось на основе визуальных наблюдений с высокого берега.

К 11 августа морской припайный лед в районе «Ледовой базы «Мыс Баранова»» оставался только в заливе Микояна (рис. 13).

Первый раз лед залива Микояна обследовался 16 июня 2014 г. Текстурно-структурный анализ льда, взятого на ровном припае между островом Спортивный и островом Двух Товарищей в южной части залива, показал, что становление льда в заливе Микояна протекало аналогично становлению припая в юго-восточной части бухты Амба (группа II). Нарастание верхних 30 см льда проходило в условиях динамической нестабильности. По мере продвижения кромки припая на север создавались условия для появления кристаллов волокнистых структур. До достижения льдом толщины 74 см прослеживалось влияние заприпайной полыньи, выразившееся в поступлении кристаллов внутриводного льда к фронту кристаллизации и формированию льда типа В5, В4. Этому способствовали постоянные подледные потоки (приливо-отливные течения) с генеральным направлением вдоль оси залива, отразившиеся в пространственной упорядоченности волокнистых кристаллов. Ниже горизонта в 74 см лед нарастал в динамически стабильных условиях с образованием льда типа В2.

7 июля были обнаружены снежицы в районе устья реки Останцовая и в местах впадения мелких ручьев. 17 июля на этих участках была зафиксирована вода. Лед в центральной части залива потемнел. К началу августа у берегов, где впадают

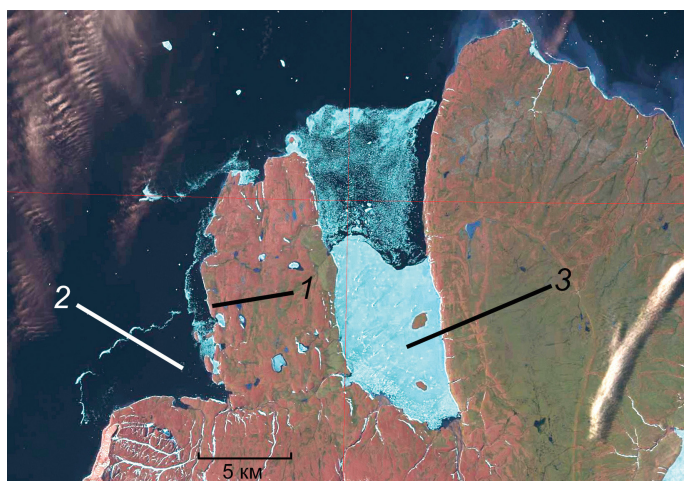


Рис. 13. Ледовая обстановка северо-восточной части пролива Шокальского за 4 дня до взлома припая. ИСЗ Landsat 8, 11.08.2014, 17:58 UTC: 1 — НИС «Ледовая база «Мыс Баранова»», 2 — бухта Амба, 3 — припай залива Микояна

Fig. 13. Ice situation of the north-eastern part of the Shokalsky Strait, 4 days before the fast ice break. Landsat satellite 8, 11.08.2014, 17:58 UTC: 1 — Research station “Ice base Cape of Baranov”, 2 — Amba Bay, 3 — the fast ice of Mikoyan Gulf

реки и ручьи, образовались закраины в несколько десятков метров. Повсеместно на льду наблюдались снежицы.

14 августа припай сохранился на небольшом участке южнее и восточнее острова Спортивный. 15 августа припай окончательно взломало, а большая часть льда была вынесена из залива.

ВЫВОДЫ

Припайный лед в районе научно-исследовательского стационара «Ледовая база «Мыс Баранова»», образовавшийся непосредственно в проливе, за пределами 100-метровой изобаты, представляет собой сложную трех-четырёхслойную систему. В закрытых бухтах или заливах нарастание льда проходит в динамически стабильных условиях. Становление припая на этих участках акватории начиналось несколько раньше, чем в других местах, и толщина этого льда больше толщины льда пролива Шокальского.

В местах повышенного снегонакопления в результате проседания льда и выступания морской воды на поверхность образуется слой инфильтрационного льда. Особенно интенсивно инфильтрационный лед образуется вдоль берегов, где наблюдаются наддувы снега толщиной до нескольких метров. Ширина полосы вдоль берега, где было зафиксировано инфильтрационное ледообразование вблизи станции, достигает 200 м. Инфильтрационный лед образуется вблизи айсбергов и торосов, где создаются благоприятные условия для аккумуляции снега.

В проливе Шокальского, в бухтах и в прибрежных районах наблюдалась пространственная упорядоченность волокнистых кристаллов. Особенно четко она прослеживалась в открытой части пролива. Анализ преобладающего направления С-оси кристаллов позволяет установить наличие или отсутствие устойчивых подледных потоков и получить их направление.

Торосообразование в районе «Ледовой базы “Мыс Баранова”» началось сразу же после начала становления припая. Лед в большей части бухты Амба и полоса льда вдоль восточного берега пролива Шокальского шириной от 0,5 до 1,5 км подверглись торошению при толщине льда 10–15 см. Позднее прошла вторая волна торошения, с толщиной блоков льда в торосах 20–30 см, граница которой в сторону бухты Амба ограничивалась примерно 50-метровой изобатой. Несколько мористее этой полосы были обнаружены торосы с толщиной блоков льда 30–35 см.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам научно-исследовательского стационара «Ледовая база “Мыс Баранова”», оказавшим помощь в получении экспериментальных данных. Работа выполнена в рамках плановой научной тематики ААНИИ 1.5.4.5 по проекту ЦНТП Росгидромета.

Acknowledgments. Authors express their gratitude to the employees of the research station “Ice base “Cape of Baranov”, assisted in receiving the experimental data. The work was carried out within the project 1.5.4.5 of the of Roshydromet’s CSTP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по изучению физико-механических свойств льда / Под ред. Г.Н.Яковлева. Л.: ААНИИ, 1971. 46 с.
2. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Бородкин В.А., Нубом А.А., Шушлебін А.И. Инструментальный мониторинг и краткосрочный прогноз явлений сжатия и торошения в морских льдах. СПб.: ААНИИ, 2017. 174 с.
3. Черепанов Н.В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 77–99.
4. Черепанов Н.В. Пространственная упорядоченность структуры морского льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1971. Т. 38. С. 137–140.
5. Страхов М.В. Исследование пространственно-ориентированных кристаллических структур арктического морского льда. Электрофизические и физико-механические свойства льда / Под ред. В.В. Богородского, В.П. Гаврило. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 134–143.
6. Черепанов Н.В., Страхов М.В. Лабораторные исследования ориентированного роста кристаллов в движущемся водном потоке. Электрофизические и физико-механические свойства льда / Под ред. В.В. Богородского, В.П. Гаврило. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 144–153.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po izucheniyu fiziko-mekhanicheskikh svoystv l'da*. Manual for the studying of physico-mechanical properties of ice. Ed. G.N. Yakovlev. Leningrad: AARI, 1971: 46 p. [In Russian].
2. *Smirnov V.N., Kovalev S.M., Borodkin V.A., Nubom A.A., Shushlebin A.I. Instrumental'niy monitoring i kratkosrochniy prognoz yavleniy sjatiya i torosheniya v morskikh l'dah*. Instrumental monitoring and short-term forecast of compression and ridging in sea ices. St. Petersburg: AARI, 2017: 174 p. [In Russian].
3. *Cherepanov N.V. Classification of ice of natural reservoirs. Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchnoy-issledovatel'skogo instituta*. Proc. AARI. 1976, 331: 77–99. [In Russian].
4. *Cherepanov N.V. Spatial orderliness of the sea ice structure. Problemy Arctiki I Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 1971, 38: 137–140. [In Russian].
5. *Strakhov M. V. Electro-fizicheskie I fiziko-mekhanicheskie svoystva l'da*. Investigation of the spatial-oriented crystal structures of the arctic sea ice. Electro-physical and physico-mechanical properties of ice. Ed.: V.V.Bogorodsky, V.P. Gavrilov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989: 134–143. [In Russian].
6. *Cherepanov N.V., Strakhov M.V. Electro-fizicheskie I fiziko-mekhanicheskie svoystva l'da*. Laboratory investigations of the oriented growth of crystals in the moving flow of water. Electro-physical and physico-mechanical properties of ice. Ed.: V.V.Bogorodsky, V.P.Gavrilov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989: 144–153. [In Russian].