

УДК 532.322

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-63-76

**ИЗМЕНЕНИЕ СТРОЕНИЯ И НЕКОТОРЫХ  
ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РОВНОГО ПРИПАЙНОГО ЛЬДА  
В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2014 г.  
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*

**CHANGE OF STRUCTURE AND SOME PHYSICAL PROPERTIES  
OF LEVEL FAST ICE DURING THE SPRING  
AND SUMMER PERIOD OF 2014 IN THE VICINITY  
THE RESEARCH STATION “ICE BASE CAPE 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 August, 22, 2018*

*Accepted March, 15, 2019*

*Keywords: ice destruction, salinity, temperature, thermal metamorphism, texture.*

**Summary**

The determination of the main physical properties of the fast ice around the research station “Ice base Cape of Baranov” was carried out from May 23 to August 7, 2014. At the beginning of the observations the ice was a system of three main layers reflecting the conditions of fast ice formation. The top 70 cm of the ice was formed under the conditions of dynamic variability. The ice formation to the level of 110 cm was more stable, and the lowerst layer below 110 cm grew without hummocking and thawing. In the second decade of June the ice accretion began on top due to recrystallization on snow and ice boundary. In the third decade of June the accretion process at the ice-snow interface was replaced by surface melting and destruction layer development. These changes are assumed to begin as maximum air temperatures keep above zero. By the second decade of July all the ice core had undergone serious internal changes. In the third decade of July the process of inter-crystalline-binding degradation affected the whole ice core.

---

**Citation:** *Borodkin V.A., Kovalev S.M., Shushlebin A.I.* Change of structure and some physical properties of level fast ice during the spring and summer period of 2014 in the vicinity the research station “Ice base Cape Baranov”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 1: 63–76. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-63-76.

---

From the end of the third decade of June the formation of plate-like crystals was registered at the lower ice border, as well as the accretion of new ice in the form of layers of various thickness and density. The process had reached the maximum by mid July when new ice up to 30 cm thick was formed. In the third decade of July this ice begun to melt. New ice accretion is primarily due to the presence of a layer of desalinated water under the ice.

*Поступила 22 августа 2018 г.*

*Принята к печати 15 марта 2019 г.*

*Ключевые слова:* разрушенность, соленость, текстура, температура, термометаморфизм.

С 23 мая по 7 августа 2014 г. проводилось определение основных физических свойств припайного льда в районе научно-исследовательского стационара «Ледовая база Мыс Баранова». В начале наблюдений лед представлял собой систему, состоящую из трех основных слоев, отражающих условия формирования припайного льда. Во второй декаде июня началось нарастание льда сверху за счет процессов перекристаллизации на границе льда и снега. В третьей декаде июня оно сменилось поверхностным таянием и развитием слоя деструкции. Процессы разрушения межкристаллических связей затронули всю толщу льда. С конца третьей декады июня на нижней границе льда отмечалось образование пластинчатых кристаллов и нарастание нового льда в виде слоев различной толщины и плотности. В третьей декаде июля началось таяние этого льда. Процесс нарастания нового льда в первую очередь связан с наличием распresненного подледного слоя воды.

#### ВВЕДЕНИЕ

Возобновление интереса к промышленному развитию арктических районов стимулировало возрождение исследований в области физических свойств морского льда, прерванных в начале 90-х гг. прошлого века. Изменения климатических условий за последние 20 лет делают эти работы актуальными и своевременными. Возникла необходимость постоянного мониторинга и прогнозирования состояния ледяного покрова, строения льда и его физических свойств в арктических морях и особенно в местах хозяйственной деятельности. С этой целью представляется необходимым переход от измерений физических свойств льда в определенной точке к изучению процессов формирования, развития и разрушения льда, где полученные данные измерений отражают физические свойства льда на определенном этапе этих процессов. В этом ключевую роль играет предложенная Н.В. Черепановым классификация льдов природных водоемов [1], в основе которой лежат кристаллическое строение льда и условия ледообразования, приводящие к формированию льда определенного генетического типа. Последнее положение позволяет по структуре и текстуре льда восстановить историю условий ледообразования в различные временные периоды. При решении обратной задачи появляется возможность по прогнозу условий ледообразования, которые зависят от гидрометеорологических условий, динамики ледяного покрова и локальных особенностей региона, спрогнозировать процесс нарастания льда с учетом его строения. Поскольку большинство физических свойств льда зависят от его строения, то появляется возможность их прогнозирования. С 2014 г. на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» возобновились работы, связанные с изучением пространственно-временной изменчивости строения и физических свойств ровного припайного морского льда в акватории пролива Шокальского. Данная работа освещает один из этапов этих исследований.

Основными задачами исследования временной изменчивости некоторых физических свойств ровного припайного льда в районе НИС «Ледовая база Мыс Баранова» являлись: получение сведений о строении и физических свойствах льда, а также

изучение процессов метаморфизма в однолетнем припайном льду в весенне-летний период с учетом влияния стоковых вод суши в проливе Шокальского архипелага Северная Земля.

В рамках поставленных задач выполнялись следующие виды работ: отбор кернов для определения температуры льда и его солёности; измерения толщины снежного и ледяного покрова и превышения поверхности льда над поверхностью воды; отбор проб льда для текстурно-структурного анализа. В ледовой лаборатории проводилось разделявание кернов льда на фрагменты, по которым проводился текстурно-структурный анализ, фотографирование образцов льда, дешифровка полученных фотографий и полевых записей с последующим описанием основных характеристик текстурного рисунка и строения льда, определение солёности отобранных образцов льда.

В конце восьмидесятых годов прошлого века попытка проведения подобных работ была предпринята в районе острова Средний архипелага Седова, но в начале девяностых годов работы были свернуты. Изучение процессов формирования ледяного покрова, строения и физических свойств морского припайного льда в акватории архипелага Северная Земля остается актуальной задачей мониторинга процессов становления, нарастания, внутреннего изменения и разрушения льда в арктических морях.

#### **МЕТОДИКА РАБОТ**

Работы выполнялись в характерной точке ровного припайного однолетнего льда. Для отбора образцов выбиралось место с неповрежденным снежным покровом, высота которого определялась снегомерной рейкой. Измерялась температура воздуха, температура на границах воздух – снег и снег – лед. Отбор образцов льда для измерения температуры и взятия проб на солёность производился кольцевым буром с диаметром внешнего кольца 220 мм. Сразу после взятия керна проводился внешний осмотр взятого образца, измерялась длина керна, выделялись видимые слои и другие характерные признаки. Через каждые 10 см датчиком GTN 175/Pt измерялась температура льда. Для защиты льда от воздействия солнечной радиации использовался светоотражающий тубус.

Пробы для определения солёности отбирались из ледяных кернов с выбранных горизонтов. Для этого выпиливались кольца толщиной примерно 2 см, затем они очищались от внешнего слоя и упаковывались в двойные пластиковые пакеты. Взятые образцы доставлялись в теплую лабораторию для плавления. Солёность льда определялась по электропроводности талой воды кондуктометром HannaHI 8733.

Для исследования пространственной ориентации волокнистых кристаллов и для получения срезов льда по толщине в одной плоскости для различных кернов проводилось ориентирование керна по магнитному компасу. После извлечения керна на поверхность измерялась его длина и фиксировались видимые слои. Взятые образцы льда перевозились в холодную лабораторию с морозильной установкой.

В ледовой лаборатории привезенный керн льда распиливался на блоки с сохранением общей ориентации каждого блока. Из полученных блоков выпиливались вертикальные пластины шириной 15 см и толщиной 2 см, которые использовались для анализа. Стыковка полученных пластин между собой позволяла получить полный вертикальный срез керна на всю его толщину. На выбранных участках выпиливались горизонтальные срезы льда толщиной 2 см. Все полученные пластины льда исследо-

вались на предмет наличия включений. Определялись их размеры и форма, наличие слоистости. Определялся общий текстурный рисунок льда в целом и на отдельных участках. Вертикальные и горизонтальные пластины фотографировались на черной поверхности в ледовой лаборатории или, если позволяла погода, вне помещения.

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

Для получения изображения нижней поверхности льда в пробуренную скважину опускалась фотокамера COOLPIXAW110 фирмы Nikon, способная вести съемку под водой.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

Исследование временной изменчивости строения ледяного покрова в 2014 г. проводилось в характерной точке припайного льда пролива Шокальского. Становление припая в районе исследований произошло в середине октября 2013 г. и сопровождалось динамически нестабильной гидрометеорологической обстановкой. Повсеместно происходило наслоение и торошение льда толщиной до 10–15 см. На расстоянии нескольких сотен метров от точки наблюдений со стороны пролива Шокальского до конца октября сохранялась полынья, являвшаяся источником образования внутриводного льда. Становление припая в проливе Шокальского в средней его части произошло в третьей декаде ноября. Условия формирования ледяного покрова нашли отражение в строении льда, его морфологических особенностях.

Текстурно-структурный анализ показал, что верхний слой, толщина которого изменялась от 5 до 15 см, состоял из начальных форм ледообразования. Это или водно-снежный лед, или лед, образованный от сбивания мелких кристаллов начальных стадий ледообразования и внутриводного льда под действием волнения. Прослеживаются следы торошения и наслоения молодого льда. Нижележащий лед, примерно до горизонта 70 см, представляет собой набивной слой, сформированный зернистыми кристаллами внутриводного и шугового льда, мелкими обломками от торошения и продуктами разрушения кромок льда на границе припая, чередующимися с вновь нарастающими кристаллами шестоватой формы. Текстурный рисунок слоистый, с расположением слоев под разными углами к поверхности льда. Текстура льда указывает на близкое расположение кромки припая и наличие открытой воды. После достижения льдом толщины 70 см граница припая отодвинулась от места исследований на значительное расстояние (15–50 км). С этого момента формируется лед волокнистой структуры с включением кристаллов внутриводного льда, по количеству не превышающих 25 % от общего количества кристаллов, относящегося ко льду генетического типа В4 (слой льда 70–110 см).

В текстуре льда появились капиллярные включения, характерные для волокнистой структуры льда, но следы слоистости в виде полос с различным количеством воздушных и солевых включений сохранились. Слоистость льда часто проявляется в проливах с наличием сильных течений. Присутствие течений подтверждается пространственной упорядоченностью кристаллов волокнистой структуры, главная оптическая ось которых (С-ось) имеет два преобладающих направления: ССВ – ЮЮЗ (51 % кристаллов) и ЗСЗ – ВЮВ (33 % кристаллов). На рис. 1 представлен

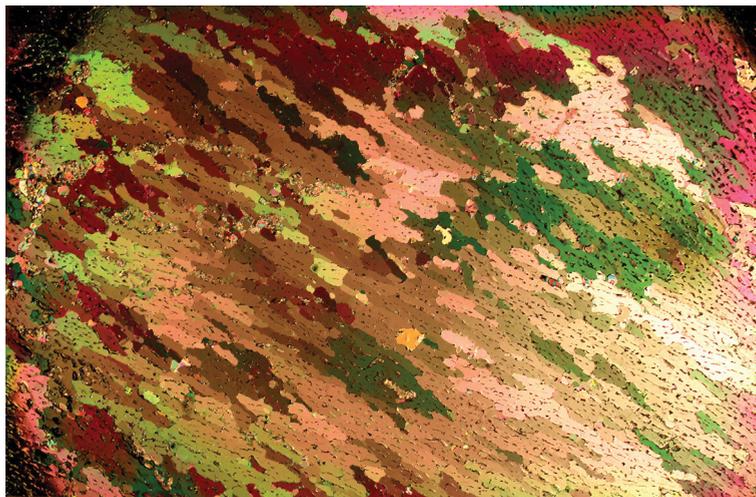


Рис. 1. Пространственная упорядоченность кристаллов льда волокнистой структуры на горизонте 75 см (горизонтальный срез)

Fig. 1. Spatial orderliness of ice crystals with fibrous structure on the 75 cm horizon (horizontal thin section)

пример кристаллического строения льда типа В4 в горизонтальном срезе на глубине 75 см. С толщины льда 110–120 см развилась кристаллическая структура типа В2 с хорошо сформированными волокнистыми кристаллами без включений кристаллов внутриводного льда, имеющая четко выраженный ажурный слой на последних нескольких сантиметрах льда. Это указывает на ослабление влияния заприпайной полыни на формирование льда в точке наблюдений.

Определение основных физических свойств припайного льда в 2014 г. было начато 23 мая. К этому времени из-за повышения температуры воздуха и воздействия солнечной радиации во льду произошли существенные изменения. Практически по всей толщине льда наблюдались процессы термометаморфизма, выразившиеся в помутнении льда на отдельных участках вследствие частичного разрушения межкристаллических соединений и оплавления стенок кристаллов, видоизменении и укрупнении солевых включений, образовании солевых канальцев и стоковых русел. Внутренняя разрушенность льда в этот период оценивается как промежуточная между первой и второй стадиями состояния льда [2]. Наибольшие изменения произошли в поверхностном слое на границе снег – лед и особенно в верхних 2–5 см, где наблюдались процессы разрушения кристаллов льда и их перекристаллизации. Зафиксировано стекание рассола с верхних горизонтов и выравнивание солености льда по толщине (рис. 2).

Существенное влияние на формирование стоковых канальцев и русел оказывает структурная слоистость льда. Границы слоев с разным кристаллическим строением служат своеобразным препятствием для свободного стока рассола, провоцируя накопление солей на определенных участках, формирование каверн и полостей (рис. 3).

В слоях льда с волокнистой структурой на участках прерывания роста кристаллов, особенно при включении в волокнистую структуру кристаллов внутриводного

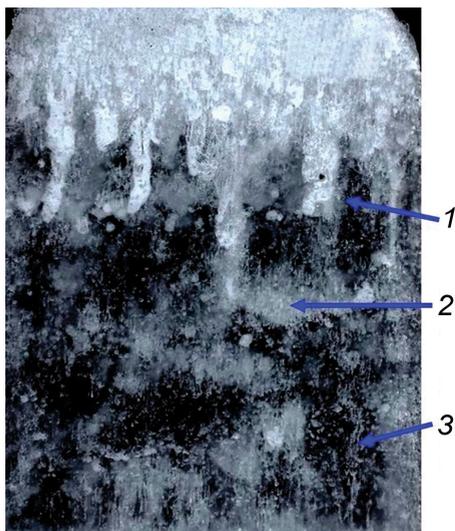


Рис. 2. Процессы термометаморфизма в верхнем слое льда, 23.05.2014:

1 — стекание рассола с поверхностных слоев, 2 — слияние солевых включений и накопление рассола, 3 — соединение мелкопузыристых включений в цепочку и начало формирования стокового каналца

Fig. 2. Thermal metamorphism in the top ice layer, 23.05.2014:

1 — brine runoff from the surface layers, 2 — saline inclusions merging and brine accumulation, 3 — arrangement of small-bubble inclusions in a chain and the beginning of plot tubule formation

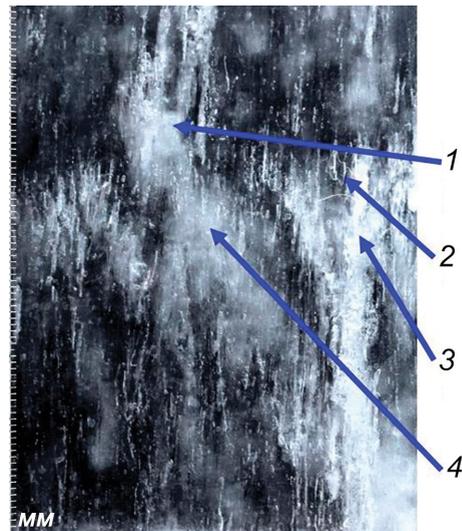


Рис. 3. Влияние структурной слоистости льда на процессы термометаморфизма на горизонте 113 см, 23.05.2014:

1 — конец стокового солевого канала и образование полости, 2 — слой прерывания роста волокнистых кристаллов, 3 — возникновение нового стокового канала, 4 — помутнение льда

Fig. 3. Effect of structural ice stratification on thermal metamorphism on the 113 cm horizon, 23.05.2014:

1 — the end of the plot salt channel and cavity formation, 2 — the layer of the interruption of fibrous crystals growth, 3 — emergence of a new plot channel, 4 — ice turbidity

льда, происходит особенно сильное разрушение межкристаллических соединений. Стенки капиллярных включений оплавляются, сами включения увеличиваются в размерах, создавая сложные переплетения вторичных извилистых включений. В результате на этих участках формируются четко выраженные слои повышенной внутренней разрушенности, которые в виде белесых полос с вертикальными прожилками пересекают толщу льда. В дальнейшем в таких участках образуются каверны и полости, что значительно ослабляет лед.

Для оценки изменений метрических характеристик (процессы нарастания и таяния) и глубины слоя разрушения льда использовался метод синхронизации слоев. В основе его лежит положение о том, что любые существенные изменения в окружающей среде находят отражение в строении льда при его нарастании. Так как керны отбирались из одного места, расположение слоев в толще льда у этих кернов будет примерно одинаковым. За линию синхронизации был взят слой прерывания роста волокнистых кристаллов на горизонте 126 см, от которого в дальнейшем проводились все вычисления. Этот прием позволил отследить процессы таяния и нарастания льда за время наблюдений (рис. 4).

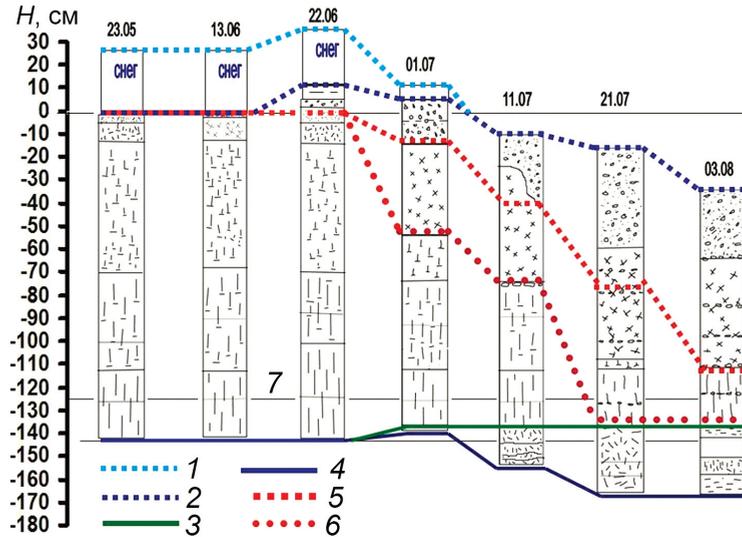


Рис. 4. Сезонные изменения в припайном льду в 2014 году:

1 — поверхность снега, 2 — поверхность льда, 3 — нижняя граница зимнего льда, 4 — нижняя граница льда, 5 — граница слоя деструкции (разрушение межкристаллических связей и частичная перекристаллизация), 6 — граница частичного нарушения межкристаллических связей, 7 — линия синхронизации

Fig. 4. Seasonal changes in fast ice in 2014:

1 — snow surface, 2 — ice surface, 3 — lower boundary of the winter ice, 4 — lower ice boundary, 5 — destruction layer boundary (intercrystalline binding destruction and partial recrystallization), 6 — the boundary of partial intercrystalline binding destruction, 7 — the line of synchronization.

В процессе сезонных изменений припайного льда на полигоне в весенне-летний период 2014 г. можно выделить несколько основных факторов:

- поверхностное нарастание и таяние льда;
- таяние и нарастание льда на нижней границе;
- внутренние изменения в строении льда под действием процессов термо-метаморфизма.

В последней декаде мая и начале июня существенных изменений в метрических характеристиках льда не происходило, только на границе снег – лед в тонком слое примерно 2 см под действием радиационного прогрева и ночного охлаждения наблюдались процессы перекристаллизации первичных кристаллов льда и снега. Поверхность льда стала влажной, состоящей из слоя небольших зерен диаметром 2–5 мм. Внутри льда продолжалось формирование вторичных включений. Увеличилось количество небольших стоковых канальцев. Внутренняя разрушенность льда оставалась между первой и второй стадиями состояния.

Во второй декаде июня, под действием солнечной радиации, несмотря на сохранение отрицательной температуры воздуха, усилились процессы разрушения на поверхности льда. Радиационный прогрев на границе лед – снег сопровождался разрушением межкристаллических прослоек, оплавлением кристаллов и таянием льда и снега. Отрицательные температуры воздуха и запас «холода» в нижележащих слоях льда приводил к частичной или полной режеляционной перекристаллизации в этом

слое. Поверхность льда утратила четкие границы и превратилась в рыхлый слой, сложенный из зернистых ледяных образований округлой формы диаметром 2–5 мм.

Общая соленость льда в начале июня продолжала снижаться с 3,14 ‰ 3 июня до 2,82 ‰ 12 июня, а средняя температура льда повышалась с 23 мая примерно на 0,5 °С в декаду (см. таблицу).

Таблица

Некоторые характеристики припайного льда в весенне-летний период 2014 г.

Характеристики	Дата							
	23 V	2 VI	12 VI	22 VI	1 VII	11 VII	21 VII	3 VIII
$H_{\text{сн}}$ , см	27	29	30	30	2	0	0	0
$H_{\text{л}}$ , см	142	151	141	148	145	149	155	134
$\Delta H$ , см	4	12	3	9	9	11	8	8
$H_{\text{л}}$ , см, зимнего	142	151	141	142	140	132	124	104
$H_{\text{л}}$ , см, стаявшего	0	0	0	0	2	10	18	36
$H_{\text{л}}$ , см, нарощего	0	0	0	6	6	17	31	30
Слой деструкции	0	0	2	12	20	30	46	80
$T_{\text{возд}}$ , °С	-2,6	-0,8	-0,1	4,8	2,3	0,5	1,5	1,2
$T_{\text{л}}$ , °С, средняя	-2,8	-2,3	-1,7	-1,4	-0,8	-0,2	-0,1	0,0
$T_{\text{л}}$ , °С, минимальная	-4,2	-2,6	-1,9	-1,6	-1,4	-0,5	-0,3	-0,1
$S_{\text{л}}$ , ‰, средняя	3,13	3,14	2,82	3,03	2,05	0,77	0,45	0,11
$S_{\text{л}}$ , ‰, максимальная	3,73	5,12	4,33	6,71	3,54	1,76	1,58	0,29
$S_{\text{л}}$ , ‰, на поверхности	2,60	2,78	2,70	0,53	0,05	0,05	0,03	0,04
Стадия состояния льда	1–2	1–2	2	2–3	3	3–4	4	4–5
Разрушенность льда	0	0	0	1	2	3	3	3–4

Примечания:  $H_{\text{сн}}$  — толщина снега,  $H_{\text{л}}$  — толщина льда,  $\Delta H$  — превышение льда,  $T_{\text{возд}}$  — температура воздуха,  $T_{\text{л}}$  — температура льда,  $S_{\text{л}}$  — соленость льда.

В таблице представлены метрические характеристики льда в точке наблюдений, измеренные во время взятия проб для текстурно-структурного анализа, и данные о температуре и солености льда. Температура воздуха фиксировалась во время отбора проб. В строке « $H_{\text{л}}$ , зимнего» даны толщины льда осенне-зимнего образования от поверхности льда до нижней границы, без учета льда, нарощего в летний период. В строках « $H_{\text{л}}$ , стаявшего», « $H_{\text{л}}$ , нарощего» показаны значения изменений верхней и нижней границ льда относительно керна от 23 мая. В строке «Слой деструкции» даны толщины от поверхности льда, в которых наблюдалось повсеместное разрушение межкристаллических связей и частичное изменение кристаллического строения льда. В строке «Стадия состояния льда» (внутренняя разрушенность) дана оценка внутренних изменений, происходящих во льду под действием термометаморфизма в баллах [3]. В строке «Разрушенность льда» дана оценка разрушенности льда по внешним признакам [2].

Во второй декаде июня среднесуточная температура воздуха стала переходить через ноль градусов, а максимальная температура за сутки сделалась устойчиво положительной. 19 июня прошел сильный дождь, пропитавший снег дождевой водой. Во многих местах снежный покров потемнел. Избыток влаги после дождя спровоцировал образование в толще снежного покрова слоя пресного льда над поверхностью льда осенне-зимнего образования. Толщина вновь нарощего сверху льда составила 10 см, из которых 4 см — слой пресного прочного льда и 6 см — слой пористого

непрозрачного льда, легко разрушающегося при бурении. В верхних слоях льда осенне-зимнего образования продолжались процессы разрушения и перекристаллизации, делая его поверхность бугристой. Температура верхних 10 см повысилась до 0 °С, что спровоцировало стекание рассола вниз и образование каверн. Скопление каверн наблюдалось и на других горизонтах, особенно в местах разделения слоев с различной кристаллической структурой. В нижней части льда увеличилась соленость, ажурный слой (5–10 см) волокнистых структур стал непрочным и легко разрушался при механическом воздействии.

Третья декада июня была отмечена значительными изменениями в строении льда. Практически исчез снежный покров, уступив место ледяным шарикам размером до 5 мм — продуктам перекристаллизации нижних слоев снега и верхних слоев льда. На поверхности стали образовываться снежинцы. Наблюдалось резкое опреснение поверхностного слоя и стекание рассола в нижние слои. Средняя соленость льда понизилась до 2,05 ‰, а средняя температура повысилась до –0,8 °С. В верхних 60 см наблюдалось развитие деструктивного слоя с разрушением межкристаллических связей и частичной перекристаллизацией. Разрушение льда протекало не однородно по всей глубине слоя, а носило выборочный характер. Наибольшей деструкции подверглись верхние 20 см льда. В слоях льда, сложенных волокнистыми кристаллическими структурами, продолжалась трансформация трубчатых и вторичных извилистых включений, особенно в местах прерывания роста волокнистых кристаллов. Отмечалось общее помутнение льда. Внутренние изменения во льду достигли третьей стадии состояния.

Существенные изменения произошли на нижней поверхности льда. Нижний ажурный слой льда волокнистой структуры частично стал разрушаться и частично заполняться талой водой, образовав прослойку более пресного льда толщиной 1–3 см. В конце третьей декады началось интенсивное нарастание льда летнего образования.

Основными факторами, влияющими на образование нового льда в летний период при наличии отрицательной температуры основной толщи льда, являются сток талой воды с его поверхности и сток пресных вод с суши. Сток пресных вод с суши является доминирующим в этом процессе для района, где проводились наблюдения. Схематично нарастание на нижней поверхности льда летнего образования можно описать следующим образом.

1 июля произошел прорыв снежной дамбы на реке Амбе и начался бурный сток пресных вод в бухту Амба и пролив Шокальского. Температура воды в реке Мушкетова (приток реки Амбы) в районе основного гидрологического створа, расположенного выше устья реки Амбана на 2 км, в этот период составляла 0,5–0,8 °С.

Пресная вода, распространяясь под поверхностью льда, вытесняла более холодную и плотную морскую воду, прежде всего заполняя неровности на нижней поверхности льда. На границе раздела пресной и морской воды возникали благоприятные условия для зарождения кристаллов внутриводного льда которые, всплывая к нижней поверхности льда под разными углами, становились основой для развития скелетных пластинчатых кристаллов с хаотическим направлением главной оптической оси (С-оси). В результате подо льдом, главным образом в углублениях и нишах, возникла прослойка из слабо скрепленных между собой кристаллов льда различной плотности (рис. 5).

1 июля в точке наблюдений раздел пресной и морской воды находился на глубине 155 см. Достигая этой границы и не имея возможности развиваться дальше



Рис. 5. Рост пластинчатых кристаллов на нижней границе льда осенне-зимнего образования, подводная фотография на глубине 150 см, 01.07.2014

Fig. 5. Tabular ice crystals growth on the lower boundary of ice formed in autumn and winter formation layer, an underwater photo at a depth of 150 cm, 01.07.2014

вниз, пластинчатые кристаллы перестраивались. Преимущество получили кристаллы с вертикальной ориентацией С-оси и с горизонтальным ростом по базисной плоскости. В результате их смерзания формировался горизонтальный слой пресного или



Рис. 6. Рост пластинчатых кристаллов вертикального развития на нижней границе льда, подводная фотография, 01.07.2014

Fig. 6. Tabular vertical-development ice crystals growth on the lower ice boundary , an underwater photo, 01.07.2014

распресненного льда. Выше этого слоя в образовавшемся пространстве продолжалось смерзание уже находящихся там пластинчатых кристаллов и замерзание заключенной между ними воды. В результате формировался слой пористого непрозрачного льда с большим количеством воздушных включений. Ниже вновь образованного слоя льда происходило частичное перемешивание пресной и соленой воды, ее охлаждение и выравнивание температуры. Соленость воды на поверхности скважины во льду, измеренная 1 июля, составила 5,45 ‰. В условиях возникшей гомотермии подледного слоя воды преимущественное развитие получали кристаллы с горизонтальной ориентацией С-оси и вертикальным ростом по базисным плоскостям (рис. 6).

Рост этих кристаллов продолжался до тех пор, пока они не доходили до уровня раздела плотностей воды, и процесс повторялся. В результате лед летнего образования представлял собой набор слоев различной толщины и различной пористости.

В первой декаде июля среднесуточные температуры устойчиво перешли через ноль градусов и стали положительными. Средняя температура льда повысилась до  $-0,2$  °С. Произошло стремительное опреснение льда, средняя соленость которого составила 0,77 ‰. По степени внутренних изменений лед этого периода относится к промежуточной между третьей и четвертой стадиями состояния. На поверхности льда повсеместно образовались снежицы глубиной до 30 см. Продолжился процесс таяния льда сверху. Величина стаивания составила 10 см. Во льду, сложенном кристаллами волокнистой структуры, еще сохранялся первоначальный текстурный рисунок, но практически не осталось нетрансформированных первичных включений. Почти весь лед приобрел мутный оттенок.

Толщина льда летнего образования увеличилась на 17 см. Вновь образованный лед состоял из набора слоев различной прочности и пористости. Видеосъемка нижней поверхности льда показала, что признаков интенсивного роста льда снизу не наблюдалось, но отдельные пластинчатые кристаллы выступали за линию наростшего ранее льда. Слой распресненной воды подо льдом увеличился. Соленость воды на поверхности в скважине составила 0,11 ‰, на глубине 1,2 м — 0,17 ‰, на глубине 2,5 м — 21,08 ‰, на глубине 6 м — 26,38 ‰. Температура воды в реке Мушкетова, дававшей основной приток пресной воды, составляла 0,5 °С. Несмотря на явное замедление, процесс нарастания льда снизу продолжался.

Во второй декаде июля минимальные температуры воздуха устойчиво перешли через ноль градусов, став положительными. Процессы разрушения льда приобрели более интенсивный характер. Основная вода со льда ушла, но участки с водой еще остались. Глубина снежиц достигала 40 см. Поверхность льда стала неровной, бугристой. Лед на всю свою глубину претерпел частичное разрушение. Особенно сильно этот процесс проявился в верхних 70 см. На участках прерывания роста волокнистых кристаллов образовались полости размером в несколько сантиметров. Средняя температура льда поднялась до  $-0,1$  °С, средняя соленость составила 0,45 ‰ с максимальным значением 1,58 ‰ на горизонте 100 см. По степени внутренней разрушенности лед в конце второй декады соответствовал четвертой стадии состояния. Фильтрация талой воды проходила беспрепятственно во всей толще льда.

До середины июля продолжался незначительный рост нового льда на нижней поверхности. Наблюдалось увеличение слоя пресного льда на стыке с нижней границей льда осенне-зимнего образования. Увеличивалась толщина слоев в центральной



Рис. 7. Поверхность припайного льда, 03.08.2014

Fig. 7. The surface of fast ice, 03.08.2014

части молодого льда. Эти процессы продолжались благодаря поступлению талой воды сверху и ее частичному замерзанию на поверхности уже существующих слоев. В нижней части льда пластинчатые кристаллы не обнаруживались. Поднятые на поверхность после бурения льда фрагменты нижних тонких прослоек льда имели оплавленные грани кристаллов. Можно предположить, что со второй половины июля началось слабое таяние льда снизу. Всего на нижней границе льда зимнего образования вырос 31 см слоистого льда летнего образования, в то время как стаяло с поверхности 18 см. В результате толщина льда в точке наблюдений во второй декаде июля незначительно увеличилась.

В этот период значительно увеличился распресненный слой воды. Соленость воды на горизонте в 1,2 м составила 0,11 ‰, на 2,5 м — 2,39 ‰ и на 6 м — 24,78 ‰. Температура воды в скважине составила 0,1 °С, а температура воды в реке Мушке-това повысилась до 1,5–2,0 °С.

В третьей декаде июля продолжалось разрушение льда. Поверхность льда покрылась сетью углублений, наполненных водой. Появились промоины (рис. 7).

Температура воздуха достигла своего максимума в 8,9 °С. Среднесуточные температуры колебались около 2 °С. Внутренняя разрушенность льда соответствовала промежуточному значению между четвертой и пятой стадиями состояния. Верхние 80 см льда подверглись наиболее интенсивному разрушению. На воздухе лед быстро приобретал белесый цвет. Толща льда была пронизана скоплениями полостей, в основном расположенных в местах прерывания роста волокнистых кристаллов первичной структуры. В некоторых местах лед был настолько ослаблен этими полостями, что легко разламывался на куски. Стоковые каналы и русла сильно разрослись. Стеkanie талой воды проходило через лед беспрепятственно. Средняя температура льда была близка к плавлению. Лед полностью опреснился. Средняя соленость льда составила 0,11 ‰, а максимальная — 0,29 ‰ на горизонте 90 см.

Слои льда летнего образования стали разрушаться. Повсеместно исчезли пластинчатые кристаллы. Более пористый лед в промежутках между слоями стаял, а поверхности сохранившихся слоев стали оплавленными.

Процессу разрушения нижних прослоек льда летнего образования способствовало сильное волнение моря на границе припая. К моменту проведения работ кромка припая приблизилась к точке наблюдений на расстояние около 1,5 км. Прошедший накануне шторм перемешал подледные слои воды, увеличив их соленость. Так, соленость на поверхности в скважине увеличилась до 1,87 ‰, а на горизонте 1,2 м до 3,11 ‰. Граница разделения плотностей воды поднялась выше к нижней поверхности льда. На глубине 2,5 м соленость составила 24,28 ‰, а на 6 м — 26,27 ‰.

3 августа лед в точке наблюдений стоял сверху на 36 см и в то же время вырос снизу на 30 см. Общая толщина льда изменилась мало, но по своему строению и физическим параметрам лед не представлял единого целого. Лед полностью опреснился, а образовавшиеся пустоты после стекания рассола заполнились воздухом или талой водой. Верхние 80 см представляли собой деструктивный слой с большим количеством полостей, значительно снижающих его прочностные свойства. При выбуривании колонка льда легко ломалась на отдельные части. Нижние 30 см, сформировавшиеся в летний период, представляли собой набор отдельных пластин льда, разделенных прослойками воды и связанных между собой перемычками. Цельным образованием остался незначительный слой льда от 80 до 104 см, изначально сложенный волокнистыми кристаллами (тип льда В2), укрепленный на нижней границе слоем пресного льда толщиной 3–5 см. 7 августа припай в районе наблюдений взломало и наблюдения были прекращены.

#### **ВЫВОДЫ**

По своему строению лед в районе наблюдений представлял собой сложную систему, состоящую из трех основных слоев, отражающих условия формирования припайного льда. Верхние 70 см льда, сложенные зернистыми и шестоватыми (столбчатыми) кристаллами, образовались в условиях динамической неустойчивости. Нижележащий лед в слое 70–110 см представлен волокнистыми кристаллами с незначительным включением кристаллов внутриводного льда (лед типа В4) и имеет нечетко выраженную границу на горизонте 110–115 см перехода от льда типа В4 к льду типа В2, нараставшему в условиях динамической устойчивости ледообразования. Формирование этих слоев тесно связано с условиями ледостава в проливе Шокальского. Верхний слой (0–70 см) отражает начало ледообразования и формирование льда до становления припая в проливе Шокальского. Средний слой (70–110 см) сформировался после становления припая в проливе Шокальского, но под воздействием заприпайной полыньи в северной части пролива. Нижний слой 110–142 см вырос при удалении заприпайной полыньи дальше на север, где ее влияние на формирование льда было незначительным.

В третьей декаде мая внутренняя разрушенность льда характеризовалась промежуточной между первой и второй стадиями состояния, медленно прогрессируя до второй декады июня, когда началось нарастание льда сверху за счет процессов перекристаллизации на границе льда и снега, сменившееся в третьей декаде июня поверхностным таянием и развитием слоя деструкции. Границей начала сроков этих изменений может служить устойчивый переход максимальных температур воздуха через ноль градусов (18.06.2014). В первой декаде июля продолжалось интенсивное таяние льда сверху и углубление слоя деструкции. Ко второй декаде июля вся толща

льда претерпела серьезные внутренние изменения, отразившиеся в текстурном рисунке, а к третьей декаде процессы разрушения межкристаллических связей затронули всю толщу льда. Некоторую относительную монолитность сохранил внутренний слой толщиной 24 см на горизонтах 80–104 см, при общей толщине льда 134 см. Внутренняя разрушенность льда этого периода относится к промежуточной между четвертой и пятой стадиями состояния.

С конца третьей декады июня на нижней границе льда отмечалось образование пластинчатых кристаллов и нарастание нового льда в виде слоев различной толщины и плотности. Максимум этот процесс достиг к середине июля, сформировав новый лед толщиной до 30 см, состоящий из набора ледяных пластин различной толщины с пористым хрупким льдом между ними, после чего нарастание льда снизу прекратилось, и в третьей декаде июля началось таяние этого льда. Процесс нарастания нового льда в первую очередь связан с началом стока пресных вод с суши и наличием распресненного подледного слоя воды. К середине июля интенсивное нарастание льда снизу прекратилось, и утолщение отдельных пластин пресного льда проходило за счет стекания талой воды с поверхности.

**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.** The authors express their gratitude to employees of the research station “Ice base “Cape of Baranov”, who assisted in obtaining the experimental data. The study is performed in the framework of project 1.5.4.5 of the Roshydromet Targeted Scientific and Technical Program (TSTP).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черепанов Н.В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 77–99.
2. Наставление гидрологическим станциям и постам. Вып. 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Ч. 1. Гидрометеорологические наблюдения на береговых станциях и постах. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 312 с.
3. Морской лед: Сбор и анализ данных наблюдений, физические свойства и прогнозирование ледовых условий / Под ред. И.Е. Фролова, В.П. Гаврило. СПб.: ААНИИ, 1997. 402 с.

#### REFERENCES

1. Cherepanov N.V. Classification of ice of natural reservoirs. *Trudy AANII*. Proc. AARI, 1976, 331: 77–99. [In Russian].
2. *Nastavlenie gidrologicheskim stantsiyam i postam. Vypusk 9. Gidrometeorologicheskienabludeniya na morskikh stantsiyah i postah. Chast' 1. Gidrometeorologichesknie nabludeniya naberegovyh stantsiyah i postah.* Manual to hydrological stations and posts. Release 9. Hydrometeorological observations at sea stations and posts. Part 1. Hydrometeorological observations at shore stations and posts. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 312 p. [In Russian].
3. *Morskoi led. Sbor i analiz dannyh nabludenii, fizicheskie svoistva i prognozirovanie ledovyh uslovii.* Sea ice. Collecting and analysis of the observations, physical properties and forecasting of ice conditions. Eds. I.E. Frolov, V.P. Gavrilov. St. Petersburg: AARI, 1997: 402 p. [In Russian].