

Особенности текстуры многолетнего пресного льда в заливе Транскрипция (Восточная Антарктида) в период летнего таяния

© 2022 г. В.В. Харитонов*, В.А. Бородкин

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*kharitonov@aari.ru

Texture features of multi-year fresh ice in the Transcription bay, East Antarctica, in the period of summer melting

V.V. Kharitonov*, V.A. Borodkin

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*kharitonov@aari.ru

Received June 23, 2021 / Revised December 15, 2021 / Accepted April 1, 2022

Keywords: *perennial ice, Antarctica, ice core, density, air inclusions, congelation ice, infiltration ice, ice formation.*

Summary

The paper presents new data on the texture and density of a unique natural object – perennial fresh landfast ice in the Gulf of Transcription (East Antarctica), obtained in January 2020. The main purpose of the work was a planned (scheduled) inspection of the landing site selected for the 63rd season of the Russian Antarctic Expedition (RAE), investigation of the ice core sampling and analysis of its texture, including measuring the ice density. The thickness of the ice cover at the core sampling site was 3.02 m. In the long-standing (perennial) fast ice, the new ice is formed mainly from below as a natural growing of the congelation ice. From above a new ice is formed in smaller volumes, and it is either the infiltration ice in spring or freezing of melt water on the surface in autumn. Infiltration ice does not contribute much to the old fast ice, remaining a seasonal phenomenon. The reasons for that are insufficient snow accumulation in winter and the lack of salt water in the subglacial layer. In the upper layer of ice, its density is minimal and amounts to 680–720 kg/m³, increasing with depth and approaching its maximum at the lower edge – 917 kg/m³. The average density of ice is 875 kg/m³. The effect of primary air inclusions (bubbles) on the density of ice which contains large crystals of tens of centimeters in size is approximately the same for the whole ice thickness. Significant changes in the density of ice are caused by secondary inclusions which are formed during the freezing of melt water in the runoff and riverbed flows. It is shown how a crack in the ice, probably thermal, is further transformed under the influence of temperature and melt water runoff into a sinusoidal channel. This is rather common phenomenon associated with the thermal physics of the ice cover, the melting-freezing processes, and surface tension. The period of the sinusoid increases linearly with depth (the coefficient of determination $R^2 = 0.99$). Thus, the new data obtained allows expanding the present-day scientific notions on the role of physical processes in formation and evolution of long-standing (perennial) ice.

Citation: Kharitonov V.V., Borodkin V.A. Texture features of multi-year fresh ice in the Transcription bay, East Antarctica, in the period of summer melting. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (2): 275–286. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422020132, edn: epivyc.

Поступила 23 июня 2021 г. / После доработки 15 декабря 2021 г. / Принята к печати 1 апреля 2022 г.

Ключевые слова: *многолетний лёд, Антарктида, керн, плотность, воздушные включения, конжеляционный и инфильтрационный лёд, формирование льда.*

В январе 2020 г. на многолетнем пресном льду толщиной 3,02 м в заливе Транскрипция (Восточная Антарктида) – в районе полевой базы Оазис Бангера – был отобран керн, выполнен его текстурный анализ и измерена плотность льда. Исследование текстуры льда показало, что в многолетнем припае залива лёд формируется главным образом снизу с образованием конжеляционного льда естественного нарастания. Из-за недостаточного снегонакопления в зимний период и отсутствия солёной воды в подлёдном слое инфильтрационный лёд не вносит вклад в многолетний лёд, оставаясь сезонным явлением.

Введение

Лёд играет важную роль в процессах взаимодействия океана и атмосферы. Данные о физических параметрах льда используют в математических моделях, описывающих климатические

изменения в окружающей среде. Достаточно много исследований, посвящённых изучению нарастания морского льда, выполнено к настоящему времени как в Арктике, так и в Антарктике. Существенно меньше информации о многолетнем ледяном покрове. Среди публикаций на

эту тему отметим статьи о 1–2-метровом припайном льду у побережья Таймыра [1], о многолетнем льду в Нелла-фьорде (Восточная Антарктида) [2], а также историю, начиная с начала XX в., многолетнего льда в заливе Йелвертон (Канада) [3]. Авторы работы [4] исследовали взаимодействие многолетнего припая с шельфовым ледником Мерца (Восточная Антарктида). В исследовании [5] приводятся данные о толщине и вариации шероховатости над- и подводной поверхностей многолетнего льда в море Бофорта. Статистические данные о морфометрических характеристиках многолетнего льда в Канадском Арктическом архипелаге за длительный период времени опубликованы в работах [6, 7]. Исследователи Г. Тимко и У. Уикс пишут: «Знания о старом льду крайне скудны. Это может показаться удивительным, поскольку это самый тяжёлый тип льда в арктических регионах. Измерения на старом льду обходятся дорого, а из-за его большей толщины и прочности по сравнению с однолетним льдом получить их труднее. Кроме того, он не так легко доступен географически как однолетний лёд» [8].

Снежный покров сильно влияет на процессы, происходящие со льдом, особенно это заметно в Антарктике. На поверхности льда образуется снежно-водный лёд в результате пропитывания снега талой водой или просочившейся на поверхность морской водой при подтапливании льда под действием массы снега. Со временем, в период летнего таяния, происходит сток рассола и талой воды. Периодически образующаяся наледь – основная причина роста толщины антарктического ледяного припая. Она может на порядок превышать среднюю по региону толщину морского льда, как это происходит, например, в районе ледника Мерца, Восточная Антарктида [4], хотя в последние годы прослеживается тенденция к уменьшению площади, занимаемой многолетним припаем [3]. Керны льда природных водоёмов содержат «запись» условий и процессов роста и таяния льда. Согласно текстурным и изотопным исследованиям кернов антарктического многолетнего припая [2], термодинамические процессы – основной механизм, ответственный за развитие многолетнего припая. Определённый вклад вносят также процессы образования снежно-водного льда, анализ которых приведён в работе [9]. Однако инфор-

мации о физико-механических характеристиках антарктического припая явно недостаточно

В январе 2020 г. методом вертолётного десанта были выполнены однодневные исследовательские работы на уникальном природном объекте – многолетнем пресном припайном льду в заливе Транскрипция (Восточная Антарктида). Основная задача работ – плановая проверка участка ледяной поверхности, выбранного в качестве посадочной площадки в сезон 63-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ). Проверка предусматривала также исследования льда. В настоящей работе приведены новые данные о текстуре и плотности льда залива, которые представляют собой «мгновенный снимок», запечатлевший процесс развития достаточно редкого природного феномена, к которому относится данный лёд. Лишь в некоторой степени его можно сравнить со льдом, образующимся при спокойном замерзании озёрной воды [10].

Общая характеристика района и гидрометеорологических условий

Район работ расположен в центральной части залива Транскрипция на расстоянии 7 км от полевой базы Оазис Бангера (рис. 1 и 2). Фактически залив представляет собой эпিশельфовое озеро, с северной стороны примыкающее к леднику Эдисто, а с южной огороженное коренными породами оазиса. Эпিশельфовые озёра образуются из пресной воды во фьордах, полностью заблокированных ледниками. Более низкая плотность пресной воды позволяет ей находиться над солёной, а ледник консервирует зеркало озера от ветра и препятствует перемешиванию воды [11]. Согласно данным работы [12], глубина залива в центральной части достигает 100 м. До глубины 70 м вода практически пресная, с солёностью менее 1‰; солоноватые воды (0,3–19,0‰) обнаружены только у дна на глубинах 89–102 м. Температура воды у дна – 0–0,4 °С. Наличие приливной трещины подтверждает связь залива с океаном. На ледовый режим залива влияет значительная протяжённость берегов, примыкающих к леднику, поэтому эпিশельфовый залив Транскрипция не вскрывается [12]. Толщина льда летом близка к 3 м, а максимальная достигает 5 м [13]. Согласно измерениям в

сезон 64-й РАЭ в 2019 г., толщина льда в заливе составляет 2,95–3,20 м [14, 15]. Специфика района работ состоит в наличии толстого припайного многолетнего льда, сформировавшегося в условиях очень сильного распреснения и постоянной температурной стратификации подлёдного слоя морской воды. К сожалению, метеонаблюдения в этой части Оазиса Бангера не проводятся, поэтому информация по температуре, ветру и осадкам отсутствует.

Методика исследования

Полевые исследования физико-механических характеристик морского льда выполняли 1.01.2020 г. в соответствии с отечественными нормативными документами и международными стандартами. В точке с координатами 66°14,740' ю.ш. и 100°35,726' в.д. при помощи электромеханического керноотборника фирмы «Kovacs Enterprise», USA, был отобран керн. Место взятия керна находилось на расстоянии около 0,5 км от ближайшего берега. Диаметр керна – 140 мм. Установлено, что толщина льда в указанной точке залива составляет 3,02 м, что вполне согласуется с данными работ [14, 15]. Снежный покров отсутствовал.

Текстурный анализ выполняли на всю толщину ледяного покрова на основании исследования керна и вертикальных и горизонтальных ледяных пластин толщиной около 0,02 м. Для изготовления вертикальных пластин керн льда распиливался ручной ножовкой на цилиндры высотой примерно 0,2 м. Из этих цилиндров изготавливали пластины. Ориентация пластины в пространстве фиксировалась специальными метками, отмечающими верх пластины и её лицевую сторону, однотипно для всех изготовленных пластин. Также было сделано несколько горизонтальных пластин. После удаления остатков стружки от распиловки цилиндров пластины укладывали на ровную тёмную поверхность и проводили их визуальный осмотр: фиксировали включения во льду, их размер, форму и взаиморасположение. После этого пластины фотографировали на цифровую фотокамеру с разрешением, достаточным для сохранения информации о характере включений. Для масштабирования снимков к ледяным пластинам прикладывали

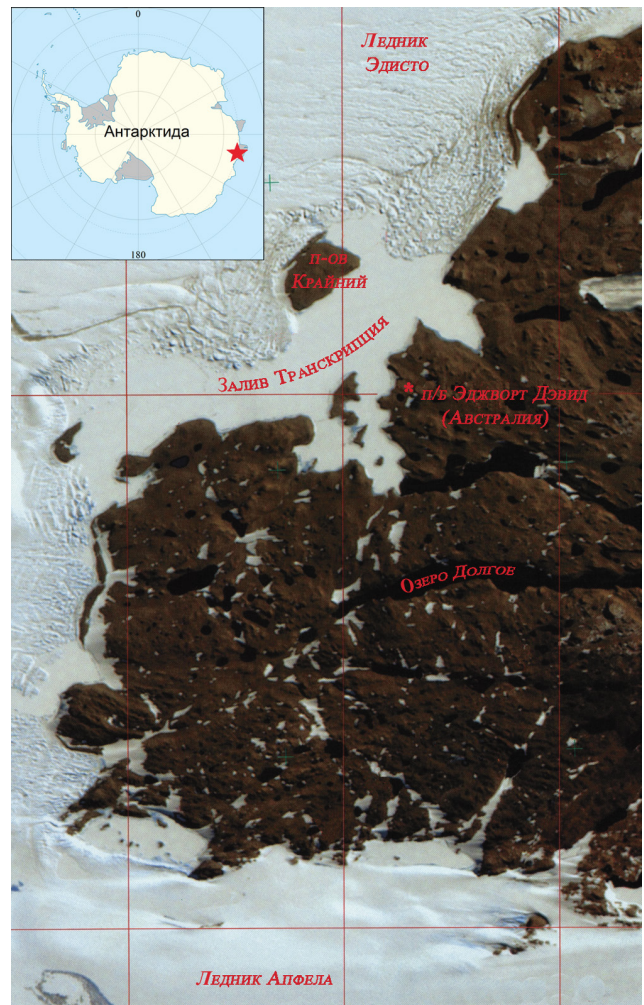


Рис. 1. Фрагмент спутникового снимка Оазиса Бангера (Восточная Антарктида) от Австралийского Антарктического управления (Australian Antarctic Division). Дата неизвестна

Fig. 1. A fragment of satellite image of Bunger Hills, East Antarctica, from the Australian Antarctic Division. Date of image unknown

рулетку с хорошо просматриваемыми делениями в 0,1, 0,01 и 0,001 м. На основании визуального осмотра и анализа полученных фотографий выделяли слои льда с отличающимся текстурным рисунком. Находили отличия включений по происхождению (воздушные, минеральные и т.д.), определяли размеры включений, их форму, положение в керне и взаиморасположение. В случае невозможной вертикальной распиловки керна текстуру описывали по визуальному осмотру самого керна или его части.

Плотность льда определяли взвешиванием в воздухе образцов льда известного объёма, при-



Рис. 2. Залив Транскрипция в январе 2019 г. [14]. Фото В.Л. Мартянова, ААНИИ
Fig. 2. Transcription Bay in January 2019 [14]. Photo by V.L. Martyanov, AARI

готовленных из выбуренных кернов. Взвешивание выполняли на электронных весах типа МК–3.2–А20, позволяющих вести измерения при отрицательных температурах воздуха. Класс точности весов – средний по ГОСТ 29329 и МР МОЗМ Р 76–1. С заданных уровней керна выпиливали образцы льда высотой преимущественно 0,2 м. При помощи штангенциркуля с точностью до 0,1 мм проводили четыре измерения диаметра и четыре измерения высоты ледяного цилиндра, которые в дальнейшем осреднялись. Далее ледяной цилиндр взвешивали на электронных весах и по массе и объёму цилиндра рассчитывали плотность образца льда.

Результаты исследования текстуры и плотности льда в заливе Транскрипция

Текстура льда. Лёд в заливе Транскрипция в точке измерений относится к многолетнему, сформированному из пресной или очень распреснённой воды ($S \leq 1\%$, [12]) и снега. Текстуальный анализ показал, что по интенсивности образования вторичных включений и их влияния на строение льда сам лёд условно можно

разделить на пять слоёв, следующих друг за другом от поверхности вниз (рис. 3).

Первый слой (горизонт 0–0,1 м) – белый, непрозрачный, состоящий из скреплённых между собой отдельных зёрен с большим количеством пузыристых включений размером от 0,1 до 5 мм. Количество включений оценивается в 5 баллов по пятибалльной шкале [16]. Скорее всего, этот слой сформировался в процессе разрушения верхнего слоя льда под действием положительных температур воздуха в сочетании с воздействием солнечной радиации в результате процессов перекристаллизации в верхнем слое льда (см. рис. 3, а).

Второй слой (горизонт 0,10–1,03 м) – непрозрачный, содержит большое количество сферических включений размером от 1 до 8 мм, расположенных в виде вертикальных цепочек. Часть включений имеет овальную форму и вытянута по вертикали (см. рис. 3, б). Количество включений оценивается в 4–5 баллов. Такое расположение сферических включений возникло из-за промерзания стоковых каналов, образующихся в летний период, частота расположения которых за многолетнее существование льда заметно увеличивается по сравнению с количеством таких же каналов в однолетнем льду. Перегород-

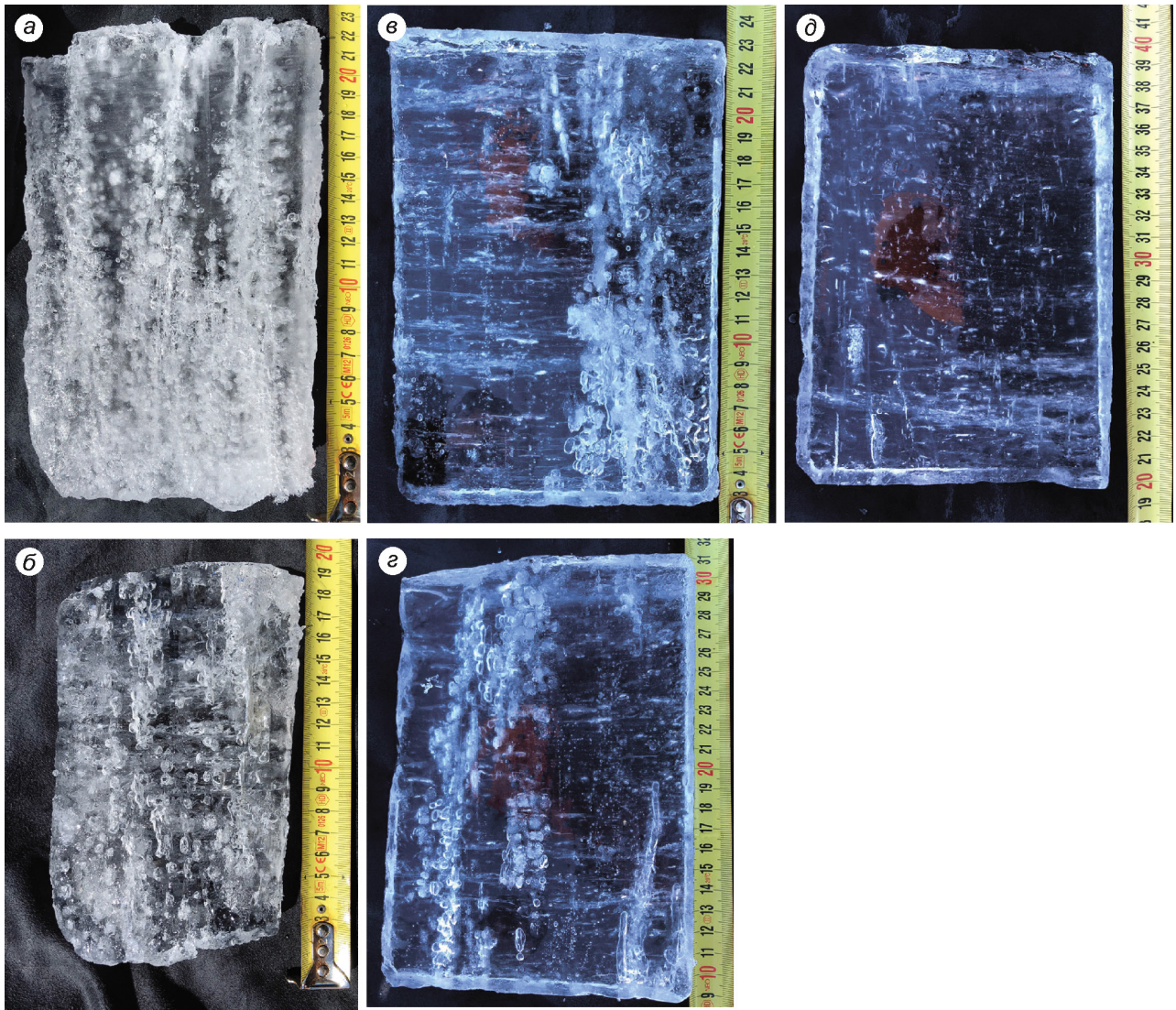


Рис. 3. Фотографии в отражённом свете вертикальных срезов льда из керна, выбуренного 1.01.2020 г. в многолетнем припае залива Транскрипция.

Текстуальный анализ показывает, что по интенсивности образования вторичных включений и их влиянию на строение льда сам лёд можно условно разделить на пять слоёв, следующих друг за другом от поверхности вниз: *а* – слой 0–0,24 м; *б* – слой 0,85–1,03 м; *в* – слой 1,27–1,47 м; *г* – слой 1,97–2,14 м; *д* – слой 2,82–3,02 м

Fig. 3. Photos of vertical ice plates from the Transcription Bay in the reflected light.

Textural analysis shows that according to the intensity of the formation of secondary inclusions and their influence on the ice structure, the ice itself can be conventionally divided into five layers, following each other from the surface down: *a* – layer of 0–0.24 m; *b* – 0.85–1.03 m; *v* – 1.27–1.47 m; *z* – 1.97–2.14 m; *d* – 2.82–3.02 m

ки между включениями под действием термометаморфических процессов частично разрушены и видоизменены. Часть стоковых каналов этого сезона образования представляют собой сквозные отверстия диаметром до 10 мм, формирующиеся в толще льда русла для стекания талой воды. В результате лёд при извлечении керна на поверхность легко разрушается по линиям расположения стоковых каналов и сферических

включений. Для залива Транскрипция характерно поступление на поверхность ледяного покрова большого количества мелких частиц пород, которые сильными ветрами перемещаются с близлежащего берега на акваторию залива [14]. Эти частицы служат очагами более интенсивного таяния льда в летний период, проникая в толщу ледяного покрова и формируя сеть вертикально ориентированных углублений различного-

го диаметра и протяжённости. Предположение, что каналы образованы в результате таяния льда в месте положения твёрдой частицы, основано на аналогичных процессах в ледниках. С наступлением холодов вода, скапливающаяся в этих углублениях, замерзает, стимулируя формирование цепочек сферических воздушных включений вертикальной направленности.

Третий слой (горизонт 1,03–1,97 м) имеет прозрачность 3–4 балла и характеризуется двумя группами включений (см. рис. 3, в). К первой группе можно отнести сферические воздушные включения диаметром 0,1–10 мм, расположенные вертикальными цепочками. Такое положение включений возникло в результате трансформации вертикальных трубчатых первичных включений. В толще льда наблюдаются отдельные сферические включения диаметром до 3–4 мм, расположенные хаотично. Ко второй группе относятся замёрзшие стоковые каналы с вертикальными цепочками сферических включений диаметром от 0,1 до 8 мм и стоковые каналы этого сезона. Частота расположения стоковых каналов значительно меньше, чем в вышележащем слое, но всё-таки достаточно велика. Количество включений по слою оценивается в 3–4 балла.

Четвёртый слой (горизонт 1,97–2,62 м) имеет прозрачность 3 балла (см. рис. 3, г). Как и в предыдущем слое, включения условно можно разделить на две группы: первая группа – цепочки и отдельные включения сферической формы диаметром 0,1–1 мм; вторая группа – скопления сферических включений от 1 до 8 мм, некоторые из них сами состоят из сгустков включений до 0,1 мм. В отличие от предыдущего слоя цепочки крупных включений иногда образуют изолированные скопления высотой в несколько сантиметров и шириной 0,02–0,03 м, которые возникли в результате промораживания крупных стоковых каналов в предыдущие годы. В четвёртом слое наблюдается прерывание стоковых каналов этого сезона образования, которые в данном керне достигают горизонта 2,50 м.

Пятый слой (горизонт 2,62–3,02 м) имеет прозрачностью 2–3 балла (см. рис. 3, д). В этом слое не наблюдается проникновение стоковых каналов текущего года. Анализ текстуры керна показал, что замёрзшие стоковые каналы предыдущих лет образования ограничены горизонтом 2,50 м. Преобладают цепочки сферических включений разме-

ром 0,1–0,5 мм, расположенные вертикально или под некоторым углом, и сгустки включений такого же размера, объединённые в сферические образования диаметром 2–5 мм. Этот слой льда можно отнести ко льду текущего сезона нарастания.

Лёд формировался главным образом снизу с образованием конжеляционного льда естественного нарастания и в меньших объёмах – сверху за счёт образования инфильтрационного льда в весенний период. Анализ текстурного рисунка позволил установить, что толщина нижнего, выросшего в сезоне этого года слоя льда равна примерно 0,40 м, а слоя льда предыдущего года – около 0,65 м, что позволяет предположить прирост толщины льда в результате естественного нарастания снизу по 0,40–0,65 м в год. Сильная внутренняя разрушенность вышележащих слоёв не позволяет идентифицировать их по годовому приросту. Текстура льда с горизонта 1,03 м до нижней границы не имеет первичных включений, характерных для инфильтрационного льда, выросшего сверху, что позволяет предположить незначительную толщину слоя этого льда и его полное таяние в летний период. Лёд в слое 0–1,10 м сильно разрушен термометаморфическими процессами и для выявления годовых циклов по текстуре непригоден.

Плотность льда. На рис. 4 приведён график распределения плотности льда по глубине. Он представлен отрезками, соответствующими длине цилиндрических кусков керна, по которым определялась плотность. Пропуск данных на горизонте 0,22–1,05 м связан с тем, что эта часть керна при извлечении из керноотборника рассыпалась на мелкие куски, а на горизонте 1,47–1,97 м – с наличием продольного скола, который нарушил цилиндрическую форму образцов, что привело к невозможности точного определения их объёма. Плотность льда, рассматриваемая как отношение общей массы льда к его объёму, будет зависеть от объёма, занятого воздушными включениями. Чем больше включений в единице объёма, тем меньше плотность льда. Это хорошо согласуется с расположением слоёв, выделенных по текстурным признакам (см. рис. 3). Плотность исследованного нами льда минимальна в верхнем слое льда – 680–720 кг/м³, возрастает с глубиной, приближаясь у нижней границы к максимуму – 917 кг/м³. Средняя плотность льда равна 875 кг/м³.

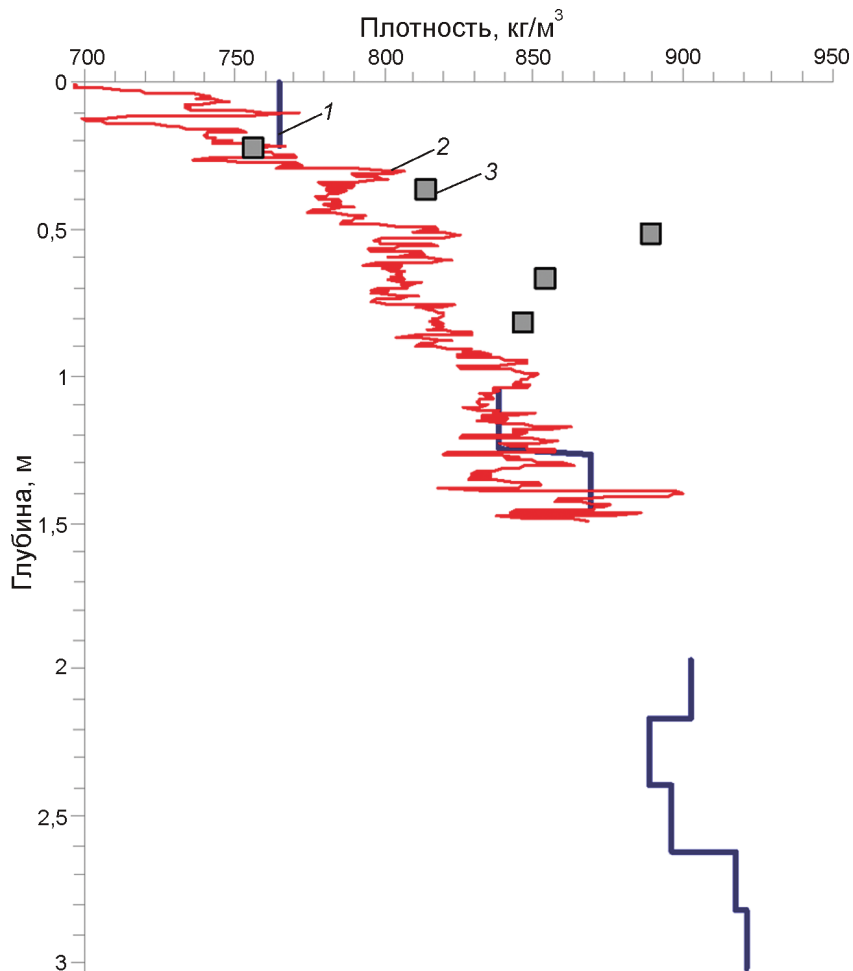


Рис. 4. Распределение плотности припайного льда в заливе Транскрипция по глубине.

Пропуск данных на горизонте 0,22–1,05 м связан с тем, что эта часть керна при извлечении из керноотборника рассыпалась на мелкие куски, а на горизонте 1,47–1,97 м – с наличием продольного скола, который нарушил цилиндрическую форму образцов, что привело к невозможности точного определения их объёма. Для сравнения нанесены значения плотности, рассчитанные по скорости электротермобурения ровного льда в Обской губе весной 2004 г. и значения плотности однолетнего морского льда из припая в заливе Лютцов-Хольм (Антарктида) из работы [17].

1 – залив Транскрипция, 2020 г.; 2 – Обская губа, 2004 г.; 3 – однолетний морской лёд в припаяе залива Лютцов-Хольм (Антарктида), 1984 г.

Fig. 4. Distribution of landfast ice density with depth in the Transcription Bay.

The lack of data at the depth of 0.22–1.05 m is due to the fact that this part of the core fell into small pieces when extracted from the core collector, and at the depth of 1.47–1.97 m – with the presence of a longitudinal chip that violated the cylindrical shape of the samples, which led to the impossibility of accurately determining their volume. For comparison, the density values calculated from the penetration rate of electric thermal drilling of level ice in the Ob Bay in the spring of 2004 and the density values of first-year sea landfast ice from the Lutzow-Holm Bay (Antarctica) [17] are plotted.

1 – Transcription Bay, 2020; 2 – Ob Bay, 2004; 3 – Lutzow-Holm Bay, 1984

Анализ и обсуждение результатов исследования льда

Полученная толщина льда, составляющая 3,02 м, совпадает с результатами измерений годичной давности [14, 15]. В условиях постоянной температурной стратификации подлёдного слоя морской воды результаты, репрезентатив-

ные для точки отбора керна и нескольких точек шнекового бурения, полученные в сезон 64-й РАЭ, могут быть экстраполированы на всю акваторию залива. Многолетний пресный лёд – довольно редкое явление, и данных о его толщине в литературе нет. М. Джонстон в работе [7] приводит данные о средней толщине многолетних ледяных полей в проливе Нэрса в Канадском Арк-

тическом архипелаге: от $3,4 \pm 1,3$ до $14,7 \pm 3,8$ м. Это — существенно выше полученного нами значения. Он также отмечает, что примерно до 23% полей имеют толщину 10 м и более. Сравнение солёного морского льда и пресного льда в заливе не совсем корректно, так как льды толщиной более 10 м, скорее всего, относятся ко льдам, выросшим сверху за счёт снежного покрова.

Поверхность льда залива на момент выполненных исследований, как и в 2019 г., была ровная [14]. Это показывает, что баланс между поступлением талой воды на поверхность и проницаемостью льда смещён в сторону высокой проницаемости льда для талой воды, что, в свою очередь, контролирует равномерность альбедо льда и морфологию поверхности льда. Вывод о том, что лёд формируется главным образом снизу с образованием конжеляционного льда естественного нарастания, приводится и в работе [18]. В ней отмечается, что нарастание льда сверху за счёт образования инфильтрационного льда в весенний период или намерзания талой воды на поверхности в осенний период происходит в меньших объёмах. Аналогичный вывод сделан в исследовании [2], где замечено, что снежно-ледяные слои могут занимать до 38% всей толщи льда. Разделение всей толщи льда на пять слоёв, рассмотренных раньше в данной статье, — условно, так как выделить чёткие границы, как это сделано для двухлетнего льда в исследовании [19], довольно трудно.

Отметим и некоторое противоречие с выводами статьи Н.В. Черепанова и А.М. Козловского [20], которые изучали строение и свойства антарктического многолетнего морского припая на станции Ленинградская в Антарктиде. Особенность такого припая — наличие слоёв водно-ледяного льда, представляющего собой смесь рассола солёностью до 58‰ с зёрнами фирна. Они считают, что толщина антарктического многолетнего припая увеличивается не за счёт конжеляционного ледообразования, а в результате процессов термического метаморфизма, возникающих на границе снежно-фирновой толщи и льда. Лёд формируется в условиях интенсивного снегонакопления и наличия солёной воды под ледяным покровом. Верхний слой припая у станции Ленинградская состоит из снежно-фирнового и инфильтрационного льда и достигает толщины 1–2 м. На нижней границе формируется слой шугового льда. В целом лёд отличается

большой неоднородностью по строению, что хорошо просматривается на текстурном рисунке [20]. Лёд в заливе Транскрипция существенно отличается по генезису от многолетнего припайного льда в районе станции Ленинградская, так как формируется в пресной или сильно распреснённой воде с отсутствием или слабовыраженным образованием шугового льда, а снегонакопление не столь интенсивное, чтобы формировать слой снежно-фирнового льда достаточной толщины, способный пережить летнее таяние. Кроме того, в связи с большой сухостью воздуха в оазисе Бангера (минимальная влажность 12%) там велика испаряемость, величина которой оценивается в 450–600 мм в год [21].

Развитие стоковых каналов в большей степени характерно для морского льда, где они формируются в результате миграции рассола. На пресном льду сток талой воды происходит за счёт формирования снежниц и стоковой системы на поверхности льда. Однако на пресном льду при наличии твёрдых частиц могут образовываться проталины вертикального развития, которые не пронизывают лёд на всю его толщину, но заполнены водой, которая при замерзании оставляет соответствующий текстурный след.

Максимальный размер воздушных включений в исследованном льду достигал 8 мм. Согласно [22], воздушные включения в снежном льду имеют сферическую форму и варьируют от нескольких миллиметров примерно до сантиметра. В этой работе рассматривается речной лёд, в то время как в процессе эволюции многолетнего льда процессы термометаморфизма могут приводить к трансформации количества и размеров воздушных включений, чем и объясняется некоторое различие в сравниваемых размерах включений. Кроме того, большое разнообразие размеров обусловлено тем обстоятельством, что размер воздушных включений распределён по логнормальному закону [23].

Залив Транскрипция не имеет открытой связи с морем и не вскрывается в летний период, а пополняется пресной водой путём притока талых пресных вод с ледника, поэтому условий для возникновения кристаллов внутриводного льда нет. В качестве гипотезы можно предположить, что преимущественное развитие в каждом зимнем сезоне будут получать уже существующие на нижней поверхности ледяного покрова кристаллы,

особенно растущие в горизонтальной плоскости. Внутри льда будут идти режеляционные процессы, способствующие укрупнению первичных кристаллов. Внутри стоковых каналов при замерзании в них воды будут образовываться более мелкие кристаллы, которые в процессе годовых циклов также будут стремиться к укрупнению.

Плотность морского льда — важная характеристика, однако сложный состав льда (наличие твёрдой фазы льда, солей, жидкой и воздушной фазы) заставляет подходить к измерению плотности более тщательно. В литературных источниках плотность льда обозначена в пределах 720–940 кг/м³ со средним значением 910 кг/м³ [24], а плотность льда над уровнем моря — 720–910 кг/м³ [5]. Средняя плотность исследованного нами льда — 875 кг/м³. Превышение льда над уровнем моря — 0,3 м. В работе [5] приведена эмпирическая формула, связывающая плотность льда с превышением. Согласно этой формуле и нашему значению превышения, плотность льда должна составлять 916 кг/м³, т.е. есть существенное различие. Следует иметь в виду, что эмпирическая формула построена на некотором облаке точек как регрессионная прямая и полученное нами значение средней плотности ложится на край этого облака точек. В этой же работе приведён график, на котором превышению льда, равному 0,3 м, соответствует толщина льда, приблизительно равная 3 м, т.е. нашему значению толщины льда.

В слоях с относительно большим количеством воздушных включений различного происхождения плотность льда последовательно возрастает от 765 до 870 кг/м³ (см. рис. 4). В слоях, меньше подвергшихся термометаморфическим изменениям (см. рис. 3, з, д), плотность льда увеличивается и приближается к плотности пресных льдов, сложенных крупными кристаллами, т.е. к 917 кг/м³. Поскольку кристаллическое строение льда тесно связано с его текстурой, текстурный рисунок указывает, что наиболее вероятно строение с крупными кристаллами, размеры которых составляют десятки сантиметров. Влияние первичных воздушных включений на плотность льда, имеющего в основе крупные кристаллы, остаётся примерно одинаковым для всего льда, и существенные изменения в плотность льда будут вносить в основном вторичные включения, возникшие в результате трансформации первичных включений. При замерзании талой воды в сто-

ковых каналах и руслах выделяются газы и формируются воздушные включения, создающие своеобразный текстурный рисунок. Причём этот процесс не связан с образованием воздушных включений на нижней границе льда.

Это положение подтверждают измерения плотности льда, выполненные в мае—июне 2004 г. в Обской губе. ААНИИ проводил там исследования морфометрических и прочностных характеристик припая, в том числе с помощью электротермобурения [25]. Припайный лёд состоял в основном из крупнооблочных кристаллов неправильной формы, соответствующих структурному типу А1 или А2 [16], что было обусловлено ранними сроками устойчивого ледообразования. Текстура этого типа льда — монолитная; в слоях с минимальным количеством включений плотность пресного льда приближалась к своему максимуму — 917 кг/м³. К моменту начала работ температура льда повысилась до 0 °С и её вертикальное распределение стало однородным. На рис. 4 красной линией показаны значения плотности, рассчитанные по скорости электротермобурения ровного льда в Обской губе весной 2004 г. Также для сравнения квадратиками обозначены значения плотности однолетнего морского льда из припая в заливе Лютцов-Хольм (Антарктида) из работы [17]. Как видно из графиков, плотность припая в нижних слоях выше, чем в соответствующих слоях пресноводного льда в заливе Транскрипция. Сравнивая данные по плотности льда в керне 2020 г. с данными 2019 г. [15], отметим, что в верхней части ледяного покрова лёд в 2020 г. более плотный (765 кг/м³ против 680–720 кг/м³), на глубине около 1 м разница в плотности составляет 5–20 кг/м³, на глубине около 2 м плотность льда практически одинакова. Средняя по всей толщине плотность в 2019 и 2020 гг. — близкая.

На рис. 5 показан фрагмент текстуры керна на горизонте 2,62–2,82 м. На нём виден синусоподобный канал, причём период синусоиды линейно возрастает с глубиной (коэффициент детерминации 0,99). Предположительно — это трещина, скорее всего термическая, в дальнейшем трансформировавшаяся под действием температуры и талой воды (талая вода использует эту трещину как естественный канал для стока). На это предположение указывают: достаточно прямое положение линии текстурных изменений в вертикальной плоскости и её наклон отно-

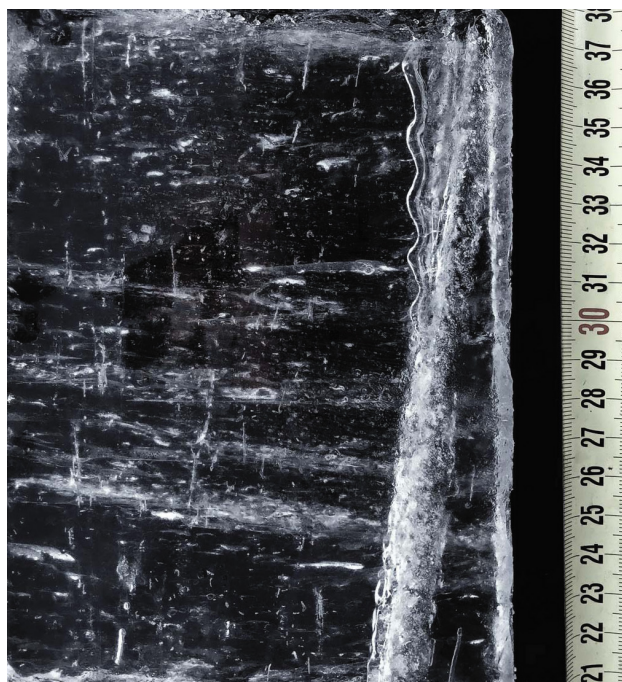


Рис. 5. Синусовидный канал на вертикальном срезе льда в отражённом свете, слой 2,62–2,82 м.

Период синусоиды линейно возрастает с глубиной (коэффициент детерминации 0,99). Предположительно, что это трещина, скорее всего, термическая, в дальнейшем трансформировавшаяся под действием температуры и талой воды (талая вода использует эту трещину как естественный канал для стока)

Fig. 5. A sinusoidal channel on a vertical slice of ice in reflected light, a layer of 2.62–2.82 m.

The period of the sinusoid increases linearly with depth (the coefficient of determination is 0.99). It is assumed that this is a crack, most likely thermal, which was subsequently transformed under the influence of temperature and meltwater (meltwater uses this crack as a natural channel for runoff)

сительно вертикали. Что касается канала синусоидального вида, то, скорее всего, это связано с тем, что вода (или рассол в солёных льдах), скапливаясь на отдельных участках канала, принимает каплевидную форму. Чем больше воды, тем больше становится капля. На стенках капли постоянно происходит процесс таяния–ледообразования с выделением и поглощением тепла, что способствует расширению капли (капля всегда стремится принять форму шара). При стоке воды остаётся округлая полость. Вода, стекая вниз, блокируется очередной преградой, и процесс начинается вновь. При замерзании воды может оставаться след в виде округлой границы капли. Увеличение размеров капель с глубиной можно объяснять по-разному: чем глубже в лёд,

тем больше воды в капле; чем глубже в лёд, тем быстрее тает лёд снизу (например, из-за повышения температуры льда) и вода спускается глубже до следующего прорыва, и т.д. Изучение этого процесса связано с теплопроводностью льда и силами поверхностного натяжения, оно требует специальных измерений и экспериментов.

Выводы и заключение

1. Лёд залива Транскрипция формируется в основном снизу с образованием конжеляционного льда естественного нарастания и в меньших объёмах – сверху за счёт образования инфильтрационного льда в весенний период или намерзания талой воды на поверхности в осенний период.

2. Инфильтрационный лёд не даёт вклада в многолетний лёд, оставаясь сезонным явлением. Причины этого – недостаточное снегонакопление в зимний период (такой вывод следует из анализа текстуры керна) и отсутствие солёной воды в подлёдном слое.

3. Плотность исследованного льда минимальна в верхнем слое льда, где она составляет 680–765 кг/м³, возрастает с глубиной, приближаясь у нижней поверхности к своему максимуму – 917 кг/м³. Средняя плотность льда – 875 кг/м³.

4. Обнаруженный в нижней части льда синусовидный канал отличается линейным увеличением периода колебаний с глубиной.

Новые данные об уникальном природном объекте – многолетнем пресном припайном льде в заливе Транскрипция (Восточная Антарктида), полученные авторами, способствуют развитию научной концепции формирования и эволюции морского ледяного покрова, суть которой состоит в том, что строение льда играет основополагающую роль в проявлении его физических свойств.

Благодарности. Работа выполнена в рамках 64-й и 65-й РАЭ. Авторы выражают благодарность руководству РАЭ в лице А.В. Клепикова за обеспечение логистики и сотруднику ААНИИ С.В. Кашину за помощь при проведении полевых работ.

Acknowledgments. This work was carried out within the framework of 64 and 65 Russian Antarctic Expedition (RAE). The authors express their gratitude to the head of the RAE A.V. Klepikov for providing logistics and Sergey Kashin of the AARI for his assistance in field work.

Литература

References

1. Reimnitz E., Eicken H., Martin T. Multiyear Fast Ice along the Taymyr Peninsula, Siberia // *Arctic*. 1995. V. 48. № 4. P. 359–367.
2. Tang S., Qin D., Ren J., Kang J., Li Z. Structure, salinity and isotopic composition of multi-year landfast sea ice in Nella Fjord, Antarctica // *Cold Regions Science and Technology*. 2007. V. 49. P. 170–177. doi: 10.1016/J.COLDREGIONS.2007.03.005.
3. Pope S., Copland L., Mueller D. Loss of Multiyear Landfast Sea Ice from Yelverton Bay, Ellesmere Island, Nunavut, Canada // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2012. V. 44. № 2. P. 210–221. doi: 10.1657/1938-4246-44.2.210.
4. Massom R.A., Giles A.B., Fricker H.A., Warner R.C., Legresy B., Hyland G., Young N., Fraser A.D. Examining the interaction between multi-year landfast sea ice and the Mertz Glacier Tongue, East Antarctica: another factor in ice sheet stability? // *Journ. of Geophys. Research*. 2010. V. 115. C12027. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JC006083>.
5. Ackley S.F., Hibler W.D., Kugzruk F., Kovacs A., Weeks W.F. Thickness and roughness variations of Arctic multi-year sea ice // *Ocean '74 IEEE. Intern. Conf. on Engineering in the Ocean Environment*. 1974. V. 1. P. 109–117. doi: 10.1109/OCEANS.1974.1161374.
6. Johnston M. Seasonal changes in the properties of first-year, second-year and multi-year ice // *Cold Regions Science and Technology*. 2017. V. 141. P. 36–53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.05.006>.
7. Johnston M. Thickness and freeboard statistics of Arctic Multi-year Ice in late summer: Three, recent drilling campaigns // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. V. 158. P. 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.016>.
8. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. V. 60. P. 107–129. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.10.003.
9. Ashton G.D. River and lake ice thickening, thinning, and snow ice formation // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. V. 68. P. 3–19. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.05.004.
10. Gow A.J. Orientation textures in ice sheets of quietly frozen lakes // *Journ. of Crystal Growth*. 1986. V. 74. P. 247–258. doi: 10.1016/0022-0248(86)90114-4.
11. Короткевич Е.С. Полярные пустыни. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 420 с. Доступно на: http://www.geolmarshrut.ru/biblioteka/catalog.php?ELEMENT_ID=3170 (accessed 11.12.2020).
12. Клоков В.Д., Кауп Э.Б., Хендель Д., Цират Р. Химический состав и экологическая характеристика озёрных вод оазиса Бангера // *Информ. бюл. САЭ*. 1960. № 111. С. 91–104.
13. *Атлас океанов. Антарктика*. СПб.: Главное управление навигации и океанографии МО РФ, 2005. 300 с.
1. Reimnitz E., Eicken H., Martin T. Multiyear Fast Ice along the Taymyr Peninsula, Siberia. *Arctic*. 1995, 48 (4): 359–367.
2. Tang S., Qin D., Ren J., Kang J., Li Z. Structure, salinity and isotopic composition of multi-year landfast sea ice in Nella Fjord, Antarctica. *Cold Regions Science and Technology*. 2007, 49: 170–177. doi: 10.1016/J.COLDREGIONS.2007.03.005.
3. Pope S., Copland L., Mueller D. Loss of Multiyear Landfast Sea Ice from Yelverton Bay, Ellesmere Island, Nunavut, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2012, 44 (2): 210–221. doi: 10.1657/1938-4246-44.2.210.
4. Massom R.A., Giles A.B., Fricker H.A., Warner R.C., Legresy B., Hyland G., Young N., Fraser A.D. Examining the interaction between multi-year landfast sea ice and the Mertz Glacier Tongue, East Antarctica: another factor in ice sheet stability? *Journ. of Geophys. Research*. 2010, 115: C12027. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JC006083>.
5. Ackley S.F., Hibler W.D. III, Kugzruk F., Kovacs A., Weeks W.F. Thickness and roughness variations of Arctic multi-year sea ice. *Ocean '74 IEEE. Intern. Conf. on Engineering in the Ocean Environment*. 1974, 1: 109–117. doi: 10.1109/OCEANS.1974.1161374.
6. Johnston M. Seasonal changes in the properties of first-year, second-year and multi-year ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2017, 141: 36–53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.05.006>.
7. Johnston M. Thickness and freeboard statistics of Arctic Multi-year Ice in late summer: Three, recent drilling campaigns. *Cold Regions Science and Technology*. 2019, 158: 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.016>.
8. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2010, 60: 107–129. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.10.003.
9. Ashton G.D. River and lake ice thickening, thinning, and snow ice formation. *Cold Regions Science and Technology*. 2011, 68: 3–19. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.05.004.
10. Gow A.J. Orientation textures in ice sheets of quietly frozen lakes. *Journ. of Crystal Growth*. 1986, 74: 247–258. doi: 10.1016/0022-0248(86)90114-4.
11. Korotkevich E.S. *Poliarnye pustyni*. Polar deserts. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1972: 420 p. [In Russian]. Available at: http://www.geolmarshrut.ru/biblioteka/catalog.php?ELEMENT_ID=3170 (accessed 11.12.2020)
12. Klokov V.D., Kaup E.B., Khendel' D., Tsirat R. Chemical composition and ecological characteristics of lake waters of the Bunger hills. *Informatsionnyi biulleten' SAE*. SAE's newsletter. 1960, 111: 91–104 [In Russian].
13. *Atlas okeanov: Antarktika*. Atlas of the oceans: Antarctica. St. Petersburg: Department of Navigation and Oceanography of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2005: 300 p. [In Russian].
14. Polyakov S.P., Martyanov V.L., Sukhanova A.A. Creating of a new RAE airfield near Banger Oasis, Antarctica.

14. Поляков С.П., Мартыанов В.Л., Суханова А.А. Организация нового аэродрома РАЭ в районе Оазиса Бангера, Антарктида // Российские полярные исследования. 2019. № 3. С. 11–15. http://www.aari.ru/misc/publicat/sources/37/RPR-37el_1_11-15.pdf.
15. Суханова А.А., Попов С.В., Поляков С.П., Кашкевич М.П., Мартыанов В.Л. Георадарные исследования для подготовки взлетно-посадочной полосы на морском льду в районе полевой базы Оазис Бангера, Восточная Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 315–327. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-315-327.
16. Черепанов Н.В., Федотов В.И., Тышко К.П. Кристаллическое строение морского льда. // Морской лёд / Под ред. И.Е. Фролова, В.П. Гаврило. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. 402 с.
17. Urabe N., Inoue M. Mechanical Properties of Antarctic Sea Ice // Journ. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1988. V. 110. P. 403–408. <http://offshoremechanics.asmedigitalcollection.asme.org/>.
18. Jeffries M.O. Massive, ancient sea-ice strata and preserved physical-structural characteristics in the Ward Hunt Ice Shelf // Annals of Glaciology. 1991. V. 15. P. 126–131. doi: <https://doi.org/10.3189/1991AoG15-1-125-131>.
19. Bjerkelund C.A., Lapp D.J., Ramseier R.O., Sinha N.K. The texture and fabric of second-year sea ice cover at Mould Bay, Prince Patrick Island, NWT, April 1983 // Proc. IEEE. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARRS). 1985. V. 1. P. 426–431. <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=ccd97163-64f4-4d58-9245-aaf710c731a6>.
20. Черепанов Н.В., Козловский А.М. Строение и некоторые свойства антарктического многолетнего припая // Информ. бюл. САЭ. 1973. Вып. 85. С. 48–53.
21. Русин Н.П. Метеорологический и радиационный режим Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 447 с.
22. Gherboudj I., Bernier M., Hicks F., Leconte R. Physical characterization of air inclusions in river ice // Cold Regions Science and Technology. 2007. V. 49. P. 179–194. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.02.008.
23. Perovich D.K., Gow A.J. A quantitative description of sea ice inclusions // Journ. of Geophys. Research. V. 101. Is. C8 15. 1996. P. 18327–18343. <https://doi.org/10.1029/96JC01688>.
24. Timco G.W., Frederking R.M.W. A Review of Sea Ice Density // Cold Regions Science and Technology. 1996. V. 24. P. 1–6. doi:10.1016/0165-232X(95)00007-X.
25. Харитонов В.В., Шушлебин А.И. Анализ результатов совместного применения зонд-индентора и теплового бурения в ледовых исследованиях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 2. С. 157–169. http://www.aari.ru/misc/publicat/paa/PAA-64/PAA_64_157-169.pdf.
- Rossiiskie poliarnye issledovaniia. Russian Polar Investigations. 2019, 3: 11–15. [In Russian]. http://www.aari.ru/misc/publicat/sources/37/RPR-37el_1_11-15.pdf.
15. Sukhanova A.A., Popov S.V., Polyakov S.P., Kashkevich M.P., Martyanov V.L. GPR research for the organization of the runway on the sea ice in the area of the Bunger Oasis field base, East Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 3: 315–327. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-315-327.
16. Cherepanov N.V., Fedorov V.I., Tyshko K.P. Crystal structure of sea ice. Eds.: Frolov I.Ye., Gavrilov V.P. *Morskoy led*. Sea ice. The collection and analysis of observational data, physical properties and forecasting ice conditions (handbook). St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1997: 402 p. [In Russian with English summary].
17. Urabe N., Inoue M. Mechanical Properties of Antarctic Sea Ice. Journ. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1988, 110: 403–408. <http://offshoremechanics.asmedigitalcollection.asme.org/>.
18. Jeffries M.O. Massive, ancient sea-ice strata and preserved physical-structural characteristics in the Ward Hunt Ice Shelf. Annals of Glaciology. 1991, 15: 126–131. doi: <https://doi.org/10.3189/1991AoG15-1-125-131>.
19. Bjerkelund C.A., Lapp D.J., Ramseier R.O., Sinha N.K. The texture and fabric of second-year sea ice cover at Mould Bay, Prince Patrick Island, NWT, April 1983. Proc. IEEE. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARRS). 1985, 1: 426–431. <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=ccd97163-64f4-4d58-9245-aaf710c731a6>.
20. Cherepanov N.V., Kozlovskii A.M. Structure and some properties of Antarctic multi-year fast ice. *Informatsionnyi biulleten' SAE*. SAE's newsletter. 1973, 85: 48–53. [In Russian].
21. Rusin N.P. *Meteorologicheskii i radiatsionnyi rezhim Antarktidi*. Meteorological and radiation regime of Antarctica. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1961: 447 p. [In Russian].
22. Gherboudj I., Bernier M., Hicks F., Leconte R. Physical characterization of air inclusions in river ice. Cold Regions Science and Technology. 2007, 49: 179–194. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.02.008.
23. Perovich D.K., Gow A.J. A quantitative description of sea ice inclusions. Journ. of Geophys. Research. 1996, 101 (C8 15) 18,327–18,343. <https://doi.org/10.1029/96JC01688>.
24. Timco G.W., Frederking R.M.W. A Review of Sea Ice Density. Cold Regions Science and Technology. 1996, 24: 1–6. doi: 10.1016/0165-232X(95)00007-X.
25. Kharitonov V.V., Shushlebin A.I. Analysis of the joint application results of a borehole jack and thermal drilling in ice research. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (2): 157–169. [In Russian with English summary]. doi: 10.20758/0555-2648-2018-64-2-157-169.