

Н.А. МЕЛЬНИЧЕНКО, А.В. ТЮБЕЕВ, А.Ю. ЛАЗАРИЮК,
Е.В. КУСТОВА, А.С. АБРАМОВ

Пористость, проницаемость и структура морского льда в бухте Новик (остров Русский) по данным гидрологических измерений, МРТ и КТ

Приведены результаты изучения вертикальной структуры морского льда Амурского залива за период с 2013 по 2020 г. по данным магнитно-резонансной (МРТ) и рентгеновской компьютерной томографии (КТ), а также результаты расчетов пористости льда по данным гидрологических измерений. Отмечены характерные отличия структуры льда, полученного замораживанием морской воды, и натурального морского льда по данным МРТ-изображений. Показано, как различные погодные условия влияют на формирование во льду каналов и пор. Рассчитаны профили эффективной проницаемости льда и числа Рэлея по данным измерений температуры и солености льда. Числа Рэлея, достигая значений 150–470 в феврале и до 11 000 в марте, оказались на 2 порядка больше типичных значений для тающих припайных льдов арктических районов. Проницаемость льда также была на 1–2 порядка больше проницаемости весенних арктических льдов. Показаны возможности компьютерной томографии для определения размеров воздушных пузырьков в порах льда.

Ключевые слова: морской лед, структура льда, проницаемость, магнитно-резонансная и компьютерная томография.

Porosity, permeability and structure sea ice in the Novik Bay (the Russian Island) on base hydrological field research, MRT and CT. N.A. MEL'NICHENKO¹, A.V. TYUVEEV², A.Yu. LAZARYUK³, E.V. KUSTOVA³, A.S. ABRAMOV¹ (¹Far Eastern Federal University, Vladivostok; ²Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok; ³V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

The results of studying the vertical structure of sea ice in the Amur Bay for the period from 2013 to 2020 according to magnetic resonance tomography (MRT) and X-ray computed tomography (CT) data, as well as the results of porosity calculations and hydrological measurements are presented. The characteristic differences in the structure of ice obtained by freezing sea water from the spatial structure of natural sea ice according to MRT images are noted. The characteristic features of the volumetric structure of channels and pores for ice formed under different weather conditions are indicated. The profiles of the effective ice permeability and the Rayleigh number were calculated from the data of temperature and salinity measurements in the ice. Rayleigh numbers turned out to be higher by 2 orders of magnitude than typical values for melting land fast ice in the Arctic regions within 150–470 in February and up to 11 000 in March. The ice permeability was also 1–2 orders of magnitude higher than the permeability of spring Arctic ice. The capabilities of computed tomography for determining the size of air bubbles in ice pores are shown.

Key words: sea ice, structure of ice, permeability, magnetic-resonance and computer tomography.

*МЕЛЬНИЧЕНКО Николай Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, АБРАМОВ Александр Семенович – кандидат физико-математических наук, доцент (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), ТЮБЕЕВ Антон Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент (Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток), ЛАЗАРИЮК Александр Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, КУСТОВА Елена Владимировна – старший инженер (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: melnichenko_2014@mail.ru

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 5 ТОИ ДВО РАН «Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана» (0271-2016-0005, регистрационный номер АААА-А17-117030110042-2).

Исследованиям свойств морского льда посвящено большое количество работ, перечисленных в известных монографиях [1–3, 8, 25] и в различных тематических публикациях, например [6, 7, 19, 20, 26, 29–31] и др. Известно, что от свойств льда, в особенности пористости, проницаемости, содержания рассола и газовых включений, зависят тепло- и газообмен через его поверхность, накопление биомассы и другие процессы в водоеме.

Имеющиеся сведения о свойствах морского льда относятся преимущественно ко льдам полярных районов. Информация об аналогичных исследованиях однолетних льдов в прибрежных районах с умеренно холодным климатом и со значительными колебаниями погодных условий практически отсутствует. Особенно это касается исследований проницаемости морского льда и ее зависимости от содержания рассола. Между тем такие сведения могут быть полезными при анализе глобальных процессов в системе океан–атмосфера.

Структура и свойства льда изучаются различными физическими методами, в том числе оптическим с фотографированием отполированных срезов кернов в поляризованном свете в различных спектральных диапазонах [17, 28], рентгеновским [21], диэлектрическим [25] и др. [1, 3]. В [2] была предложена модель кристаллизации морской воды с использованием эффективной пористости, позволяющей рассчитывать толщину льда и оценивать его характеристики. Однако справедливая для льдов арктических районов модель оказалась неприемлемой для зоны умеренных широт.

Лучшими методами изучения структуры льда без предварительной подготовки образцов являются резонансные методы, такие как ядерный магнитный резонанс (ЯМР), позволяющий определять содержание рассола без разрушения льда, и магнитно-резонансная томография (МРТ), дающая возможность видеть картину пространственного распределения твердой и жидкой фаз внутри объема льда. Использование рентгеновской компьютерной томографии (КТ) дает возможность исследовать распределение газовых включений в порах льда. Исследования методом МРТ процессов замерзания морской воды и формирования структуры льда традиционно проводилось в лабораторных условиях [10, 16, 18, 19, 22–24 и др.].

Использование метода ЯМР в натуральных условиях с использованием земного магнетизма и с искусственным градиентом магнитного поля (что является аналогом современной МРТ) для исследования морского льда в Антарктиде в море Росса было описано в работах [11, 12] и др. С помощью МРТ их авторам удалось установить распределение каналов и пор в кернах льда, сформированного в природных условиях, по размеру, что было бы невозможно сделать с помощью нерезонансных методов. В [5, 6] нами были приведены результаты изучения этим методом пространственной структуры льда Амурского залива в период с 2013 по 2016 г.

В представленной работе показаны закономерности формирования вертикальной структуры льда Амурского залива и результаты полученных с использованием МРТ, дополненных результатами КТ расчетов его пористости и характеристик проницаемости по данным зимних гидрологических наблюдений с 2013 по 2020 г. .

Целями работы были установление закономерностей формирования пористости, характера проницаемости и вертикальной структуры морского льда бухты Новик Амурского залива при различных погодных условиях – с аномально теплыми и холодными периодами льдообразования – по материалам натуральных гидрологических наблюдений в сочетании с данными МРТ и КТ, а также выявление его отличий от льдов Арктического бассейна.

Экспериментальная часть

Экспериментальные условия в 2017–2020 гг. аналогичны приведенным в наших предыдущих сообщениях [5, 6]. Изображения МР- и КМ-томограмм кернов льда были получены на медицинских магнитно-резонансном и рентгеновском томографах в

медицинском центре ДВФУ. Сведения о метеорологической обстановке в районе проведения исследований заимствованы с метеорологического сайта <http://www.rp5.ru>.

Для построения температурных профилей *in situ* измерения проводились на кернях, высверленных кольцевым буром диаметром 16 см, с шагом 5 см при помощи серии ртутных термометров от стандартных метеорологических психрометров с известными температурными поправками. Диаметр лунок составлял 8 мм, что соответствовало диаметру термометров, глубина – 5 см. Для снижения погрешности из-за нагрева термометров солнечной радиацией или их охлаждения воздухом (ветром) керны льда с термометрами защищались экранами из толстого картона. Замеры делали дважды, сначала от нижней части керна льда, контактировавшей с подледной водой, а затем в обратном направлении. Использование традиционного метода определения температуры не требовало предварительной калибровки прибора, погрешность составляла примерно 0,2–0,3 К, что было достаточно для целей наших экспериментов. Для крупных кернов массой 11 кг изменение температуры не превышало указанную погрешность по истечении 40 мин.

Соленость льда определяли по электропроводности талой воды. Для этого керны распиливали на сегменты по 4–5 см при температуре атмосферного воздуха с соблюдением мер, исключающих потери жидкой фазы и попадание снежной массы в пробы, сегменты помещали в пластиковые контейнеры с герметичной крышкой, затем растапливали при комнатной температуре в тех же емкостях, образовавшуюся воду объемом $\approx 0,8$ л пропускали через проточную систему зонда SBE-19, откалиброванного на специальном стенде. Погрешность измерения солености не превышала 0,02 ppt (parts per thousand).

Результаты и их обсуждение

Томограммы кернов тонкого однолетнего льда в бухте Новик (о-в Русский) Амурского залива, отобранных в 2013–2016 гг., были приведены в [5, 6]. На рис. 1 представлены МР-томограммы кернов, отобранных при контрастных погодных условиях в 2016–2018 гг. в феврале.

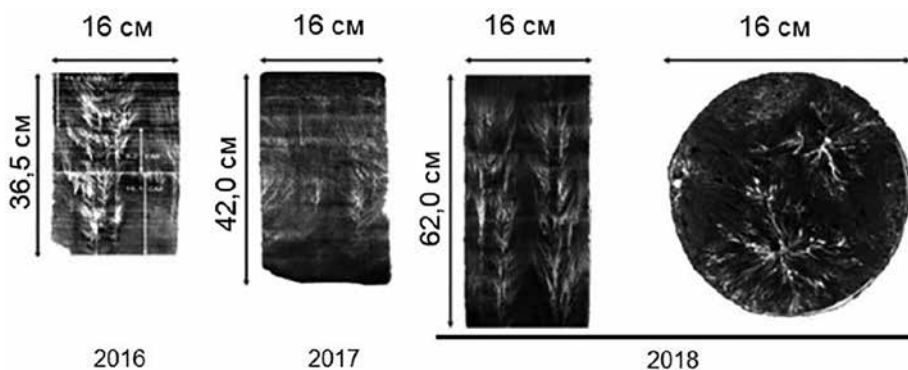


Рис. 1. МР-томограммы кернов льда, извлеченных в 2016–2018 гг. в феврале

Очевидны структурные различия образцов, в частности в керне от 2016 г. присутствуют разветвленные дендритоподобные образования, состоящие из каналов и русел раскола, и две отчетливые прослойки, разделяющие керн на три слоя толщиной 11,2, 9,2 и 16,1 см со множеством более мелких прослоек в каждом, образовавшихся из-за резких перепадов температуры воздуха во время становления льда. Наличие крупных ветвистых образований можно объяснить тем, что зима 2016 г. была теплой, снежной (в частности, благодаря двум прошедшим накануне взятия проб снегопадам). Погода в феврале 2017 г. была близкой к средним многолетним значениям; вид каналов наподобие волокон в образце, отобранном

в середине месяца, объясняется менее толстым снежным покровом, чем в аналогичный период 2016 г. Зимой 2018 г., суровой и практически бесснежной, лед сформировался относительно однородным, присутствуют размытые неравномерно распределенные прослойки в верхней части керна и небольшое количество слабо развитых дендритоподобных образований и мелких каналов изогнутой формы, переходящих из одной плоскости в другую.

Толщина сформировавшегося тонкого льда коррелировала со временем его становления, т.е. с количеством градусо-дней мороза [1]. Различие в толщине льда в аномально теплом феврале 2016 г. и в малоснежном холодном феврале 2018 г. было почти двукратным (1,7 раза), на поверхности чистого морского льда 2018 г. выступали характерные солевые «цветы» из кристаллов льда и солей как результат выдавливания рассола на поверхность, и на МРТ-изображении в горизонтальной плоскости на глубине 1,5 см от поверхности (рис. 1, справа) присутствовали многочисленные каверны.

На рис. 2 и 3 приведены графики температуры воздуха и толщины снежного покрова в 2015/16 и 2017/18 гг. На рис. 4 – МРТ- и КТ-изображения (химические реагенты для увеличения контрастности изображений в пробы льда не добавляли) вертикальной и горизонтальной плоскостей срезов средней части керна от 20.02.2020 г. на глубине 21,7 см через два дня после обильного снегопада и штормового ветра. Толщина льда составляла 36–42 см, заснеженность 60 %, высота снежного покрова ~10 см, температура воздуха 0–1 °С. Наблюдения в 2019 г. не проводились из-за малой толщины льда (менее 30 см) и раннего начала его взлома.

Как видно из МР-изображения вертикальной плоскости керна (рис. 4, а), в структуре льда выявляется примерно такая же картина из ветвистых каналов и русел рассола, какую мы наблюдали в предыдущие (2013–2015) годы [5, 6]. Однако в МР-изображениях 2017, 2018 и 2020 гг. были дополнительно различимы многочисленные нитеобразные каналы. При этом, как и в прошлые годы, можно различить отдельные прослойки, порожденные

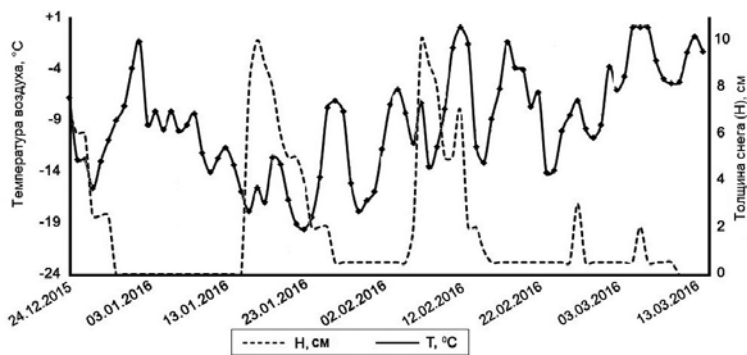


Рис. 2. Графики температуры воздуха и толщины снежного покрова зимой 2015/16 г.

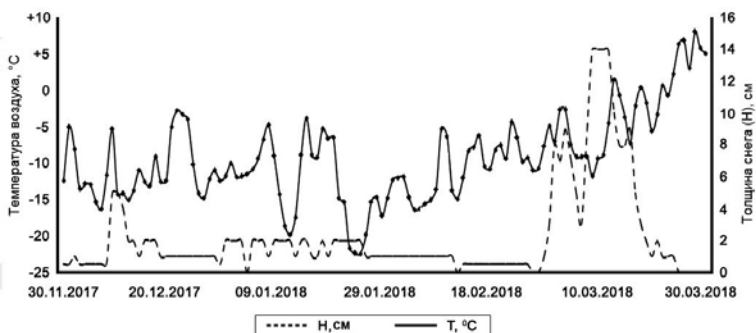


Рис. 3. Графики температуры воздуха и толщины снежного покрова зимой 2017/18 г.

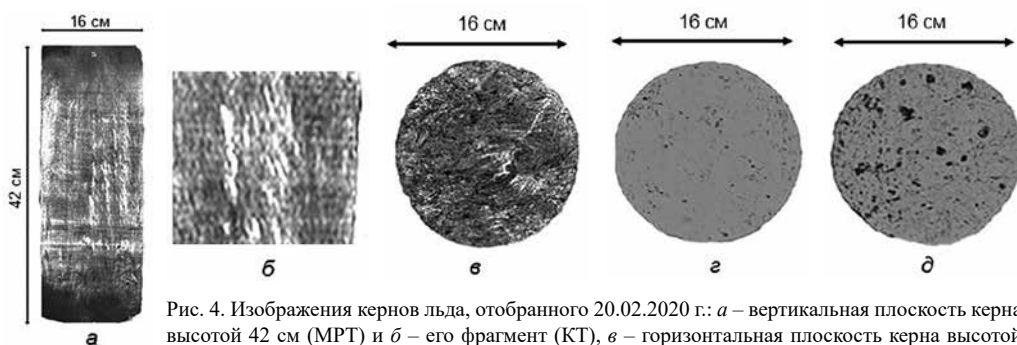


Рис. 4. Изображения кернов льда, отобранного 20.02.2020 г.: *а* – вертикальная плоскость керна высотой 42 см (МРТ) и *б* – его фрагмент (КТ), *в* – горизонтальная плоскость керна высотой 42 см на глубине 21,7 см от поверхности (МРТ), *г* и *д* – горизонтальная плоскость керна высотой 36 см на глубине соответственно 20,3 и 7,2 см от поверхности (оба – КТ)

чередованием периодов потепления и похолодания. Преобладание жидкой фазы в поверхностном слое было обусловлено проникновением в лед тающей снежной массы, а в нижнем приводном слое – стеканием рассола и интенсивным обменом с подледной водой.

На рентгеновских КТ-изображениях в вертикальной (рис 4, *б*) и горизонтальной (рис. 4, *г*, *д*) плоскостях структура льда предстает с другой стороны. Тонкие внутренние «цветы» неразличимы из-за одинаковой рентгенопрозрачности, но можно разглядеть тонкие, практически вертикальные, каналы между кристаллическими образованиями различной формы, не фиксируемые на МР-изображениях (рис. 4, *в*). Текстуру льда бухты Новик Амурского залива можно отнести к типу В-5 по классификации льдов Н.В. Черепанова, приведенной в [1]. Можно заметить, что КТ-изображение льда в вертикальной плоскости похоже на фотографический снимок отполированных и окрашенных срезов льда, но его получение не требует подготовки срезов льда. К тому же изображение внутренних масс льда можно получить в любой плоскости и на любом горизонте без распиливания керна.

Следует отметить существенное отличие МР-изображений, полученных в наших экспериментах и в [16]. Ветвистых образований из каналов и русел рассола в искусственном льду, полученном замораживанием морской воды, на приведенных в [16] рисунках не наблюдается. Ради справедливости следует отметить, что на МР-изображениях, полученных замораживанием 20%-го водного раствора сахара медной охлаждаемой сверху пластиной при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в пластиковом цилиндре, наблюдались подобные вертикальные каналы со слабо развитой ветвистой структурой, названные «дымоходами» (chimneys) [9].

Круглые пятна на горизонтальных КТ-изображениях в наших экспериментах (рис. 4, *г*, *д*) были идентичными тем, что зафиксированы на КТ-изображениях проб льда замороженной морской воды в бассейне большого размера [15]. По-видимому, эти пятна отображают пузырьки газов. Размеры пятен увеличиваются по мере приближения к поверхности льда и достигают 10 мм в поперечнике.

Информацию о пористости льда (v) можно получить из анализа результатов гидрологических наблюдений. Поскольку она связана с проницаемостью льда и числом Рэлея, которое используется при описании процессов движения рассола во льду, в [7] она определялась как

$$v = 1 - \rho_i / \rho_0, \quad (1)$$

где ρ_i – плотность льда, ρ_0 – плотность бесполостного (монокристаллического) льда. Экспериментально пористость льда определяют замещением пор воздухом. В работе Ю.Л. Назинцева и В.В. Панова [7] пористость в процентах приведена в таблице и соответствует объему рассола льда. Однако точность определений пористости до настоящего времени остается относительно невысокой. Поэтому пористость льда, его проницаемость, также как и плотность, чаще всего рассчитывают по эмпирическим соотношениям. В [26] приведено выражение для расчета эффективной проницаемости льда:

$$\Pi(\psi_v) = 10^{-17}[10^3(1 - \psi_v)]^{3,1}, \quad (2)$$

где ψ_v – доля твердой фазы, поэтому выражение в круглых скобках есть не что иное как доля жидкой фазы в пренебрежении твердыми солевыми осадками. В [4, 20] приводится подобное эмпирическое выражение, справедливое для льдов при наличии снежиц:

$$\Pi_v = 3m^3 10^{-9}, \quad (3)$$

в котором m – пористость.

Из приведенных выражений следует, что проницаемость льда примерно соответствует кубической зависимости от пористости. Но здесь, также как и в [7], не учитывается объем газовых включений, который можно рассчитать из соотношений, приведенных в [14].

Динамическую неустойчивость рассола во льду в процессе таяния снега и верхнего слоя льда характеризуют числом Рэлея, которое можно вычислить по формуле [26]:

$$Ra = (g\rho\beta\Delta Sbr\Pi(\psi_v)h)/k\eta, \quad (4)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, $\rho = 923 \text{ кг/м}^3$ – средняя плотность льда, $\beta = 0,78 \cdot \text{кг/м}^3/\text{ppt}$ – коэффициент соленосной экспансии, ΔSbr – разность солёности рассола и подледной воды, $\Pi(\psi_v)$ – эффективная проницаемость, отнесенная к отдельному слою льда, h – толщина слоя (5 см), $k = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент термической диффузии, $\eta = 2,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ – динамическая вязкость.

На рис. 5 представлены вертикальные профили температуры, солёности льда и рассчитанные по ним профили проницаемости и чисел Рэлея с 2013 по 2018 г. Профили температуры внутри льда соответствуют изменениям температуры воздуха и толщине снежного покрова и имеют практически линейный характер (образцы 2013, 2016 и 2017 гг.). А вот в 2014, 2015 и 2018 гг. наблюдался заметный минимум в среднем слое наиболее толстых (50–60 см) льдов. Профили солёности отличались многообразием форм. Так, в 2013 г. максимум солёности приходился на поверхностный слой, в 2014 г. наблюдались двойной минимум в верхнем и нижнем слоях и кривые S-образной формы с минимальными значениями на глубине от 10 до 50 см. Приводные слои за весь период наблюдений характеризовались преимущественно максимальными значениями солёности порядка 7 ppt, но в 2015 г. – 15 ppt. Кривые подобного вида наблюдались и в тонких льдах в зал. Амундсена [13]. Формы профилей проницаемости льда Амурского залива фактически отражают профили солёности, что не удивительно, так как проницаемость зависит от доли жидкой фазы, что следует из формулы (2). Числа Рэлея во всех наблюдениях неизменно резко возрастали по мере продвижения к нижнему приводному слою и там принимали максимальные значения.

Проницаемость, число Рэлея и пористость льда Амурского залива в период с 2013 по 2018 г.

Дата	$\Pi(\psi_v) \cdot 10^{-12}, \text{ м}^2$	Ra	$V_i/V_o \cdot 10^{-2}$	$V_a/V_o \cdot 10^{-2}$	$m \cdot 10^{-2}$
06.02.2013	21,2	144,3	8,54	0,58	9,12
19.03.2013	443,4	11086,0	23,00	1,71	24,72
25.01.2014	24,0	176,9	8,28	0,57	8,85
20.02.2014	21,4	200,8	7,85	0,56	8,42
13.03.2014	29,4	124,0	11,72	0,75	12,47
07.02.2015	146,8	380,1	12,08	0,56	12,64
24.02.2015	119,4	364,0	14,74	1,07	15,82
07.02.2016	20,1	160,3	8,18	0,58	8,76
12.03.2016	263,8	5050,4	20,30	1,59	21,90
18.02.2017	50,8	467,9	12,90	0,99	13,90
21.02.2018	4,7	193,8	6,63	0,41	7,04

Примечание. Пояснения см. в тексте.

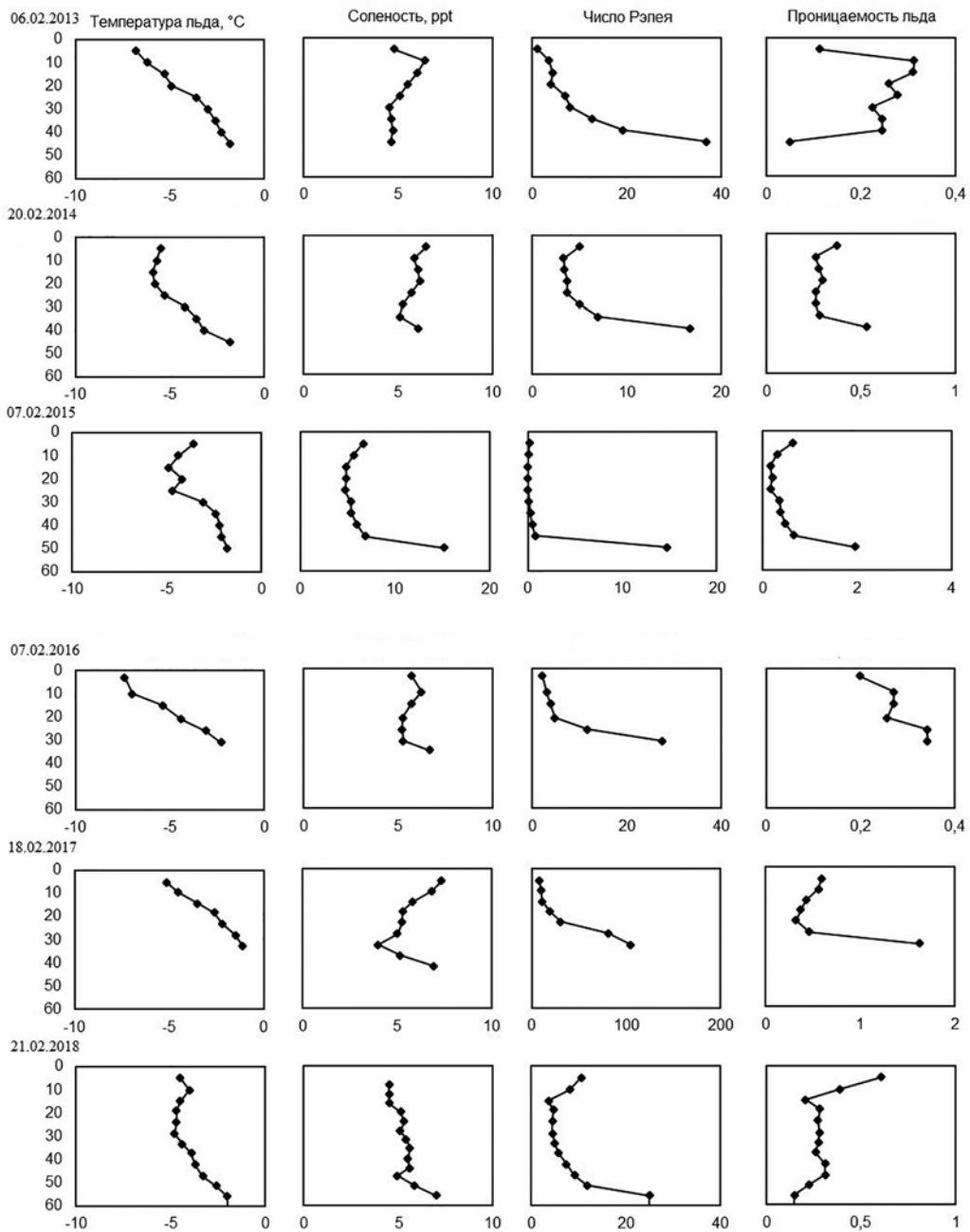


Рис. 5. Вертикальные (см) профили температуры, солености, числа Рэлея и проницаемости льда Амурского залива за период с 2013 по 2018 г.

В таблице приведены средние значения проницаемости $\Pi(\psi_v)$, числа Рэлея (Ra), относительной доли жидкой фазы V_l/V_o , газообразных включений V_a/V_o и пористости m , рассчитанные по всей толщине льда в указанные даты наблюдений, из нее видно, что в наших экспериментах числа Рэлея значительно больше характерных для льдов в зал. Аляска значений (порядка 10 и менее) [13]. Погрешность указанных параметров соответствует погрешности определения солености и не превышает 1 %. Наибольшие значения числа Рэлея были получены для мартовских образцов льда и наименьшие – для январских

и относящихся к началу февраля. У мартовских образцов 2013 г. число Рэлея превышает 630 (характерное для ячеистой конвекции рассола) примерно в 18 раз, у мартовских 2016 г. – в 8 раз [4]. В феврале значения находились в пределах, соответствующих длинноволновой радиации (288) и ячеистой конвекции (630) [4].

Проницаемость льда в бухте Новик по наблюдениям за семилетний период была на порядок больше, чем у тающих арктических льдов ($2,4 \cdot 10^{-12}$) [28]. Однако в работах [19, 27] отмечалось, что P_v в ходе таяния льда может меняться на несколько порядков, что соответствует нашим данным с учетом наличия тающего снежного покрова как в феврале, так и в марте.

Основным механизмом стекания рассола во льду является гравитационный дренаж, который усиливается давлением талой воды при большой толщине снежного покрова и высокой температуре воздуха.

Заключение и выводы

Зимний лед в бухте Новик Амурского залива на протяжении наблюдений с 2013 по 2020 г. различался не только количеством прослоек, но и степенью кристаллических разрастаний. В каждом слое льда можно было наблюдать достаточно крупные кристаллические ветвистые структуры из стоковых каналов и русел рассола. Наиболее заметные расслоения в монолитной структуре льда имели место в условиях теплой зимы 2016 г. Тогда толщина льда в начале февраля составляла всего 36,5 см, что меньше, чем в предыдущие и последующие годы. Главной причиной возникновения отчетливых прослоек в структуре тонкого льда были резкие колебания температуры воздуха.

В феврале 2016 г. при достаточно большом для региона снежном покрове структура льда заметно отличалась от таковой в малоснежные февралы 2017, 2018 и 2020 гг., что доказывает значительное влияние снежного покрова на характеристики морского льда и его структуру.

На МР-изображениях льдов Амурского залива выделяются:

- 1) отдельные прослойки, возникающие вследствие контрастов погодных условий, определяющих их количество и толщину, в том числе поверхностные и придонные прослойки, напитанные соответственно тающей снежной массой и подледной водой;
- 2) ветвистые образования, представляющие собой каналы и русла стекания рассола, количество которых зависит от интенсивности дренажа рассола;
- 3) нитеобразные и волокнистые каналы изогнутой формы, характерные для льдов большой толщины, сформировавшихся в условиях суровых зим при малой толщине снежного покрова.

Гравитационный дренаж, являющийся главным механизмом стекания рассола, значительно увеличивался под влиянием тающей снежной массы при температурах, близких к 0°C . Число Рэлея для льда в бухте Новик в феврале преимущественно находилось в пределах 200–630, соответствующих разным типам радиации и конвекции рассола во льду, однако в весенние периоды оно почти на 1–2 порядка превышало указанные значения.

Что касается различий тонкого однолетнего льда Амурского залива в бухте Новик и толстых многолетних льдов полярных районов, то можно отметить следующее:

- 1) у них сильно различается размер пор, которые в полярных районах значительно меньше вследствие постоянно низких температур. В Антарктиде, по данным [11], рассол находится в виде капель диаметром около 40 мкм и случайным образом распределяется в объеме льда двухметрового льда. Подобных «каплеобразных» ячеек в структуре льда Амурского залива мы не наблюдали. Проницаемость льда здесь была на два порядка больше характерного значения для арктических льдов;

- 2) ветвистые кристаллические образования, зафиксированные в тонком льду Амурского залива при отсутствии снега или при небольшой снежной рубашке, не наблюдались в толстых заснеженных льдах полярных районов.

Авторы благодарят сотрудников Медицинского центра ДВФУ за помощь в проведении измерений на медицинских магнитно-резонансном и рентгеновском томографах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 384 с.
2. Богородский П.В., Пнюшков А.В. Простая модель кристаллизации морской воды в спектре температур // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 4. С. 539–545.
3. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 318 с.
4. Макштас А.П., Богородский П.В., Кустов В.Ю. Быстрое таяние припайного льда в заливе Сого (бухта Тикси) весной 2011 г. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. № 1. С. 37–47.
5. Мельниченко Н.А., Тюевев А.В., Лазарюк А.Ю. и др. Вертикальное распределение рассола и объемная структура тонкого однолетнего льда Амурского залива по данным методов ядерного магнитного резонанса и магнитно-резонансной томографии // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 5. С. 859–869.
6. Мельниченко Н.А., Тюевев А.В., Лазарюк А.Ю. и др. Особенности формирования вертикальной структуры льда в бухте Новик (о-в Русский) по данным ЯМР и МРТ // *Вестн. ДВО РАН*. 2017. № 4. С. 70–80.
7. Назинцев Ю.Л., Панов В.В. Фазовый состав и теплофизические характеристики морского льда. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. 84 с.
8. Assur A. Composition of sea ice and its tensile strength // *Arctic Sea Ice*. W., DC: Nat. Acad. Sci. – Nat. Res. Council, 1958. Publ. N 598. P. 106–138.
9. Aussillous P., Sederman A.J., Gladden L. et al. Magnetic resonance imaging of structure and convection in solidifying mushy layers // *J. Fluid. Mech.* 2006. N 552. P. 99–125.
10. Brox T.I., Skidmore M.L., Brown J.R. Characterizing the internal structure of laboratory ice samples with nuclear magnetic resonance // *J. Glaciol.* 2015. Vol. 61, N 225. P. 55–64.
11. Callaghan P.T., Goy A., MacGowan D. et al. Diffraction-like effects in NMR diffusion studies of fluids in porous solids // *Nature*. 1991. Vol. 351, N 6326. P. 467–469.
12. Callaghan P., Eccles C. NMR studies on Antarctic sea ice // *Bull. Magnet. Reson.* 1996. Vol. 18, N 1/2. P. 62–64.
13. Carnat G., Papakyriakou T., Geilfus N.X. et al. Investigation on physical and textural properties of Arctic first-year sea ice in Amundsen Gulf, Canada, November 2007 – June 2008 (IPY-CFL system study) // *J. Glaciol.* 2013. Vol. 59, N 217. P. 819–837.
14. Cox G.F.N., Weeks W.F. Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice samples // *J. Glaciol.* 1983. Vol. 29, N 102. P. 306–316.
15. Crabeck O., Galley R., Delille B. et al. Imaging air volume fraction in sea ice using non-destructive X-ray tomography // *Cryosphere*. 2016. Vol. 10. P. 1125–1145.
16. Edelstein W.A., Schulson E.M. NMR imaging of salt-water ice // *J. Glaciol.* 1991. Vol. 37, N 125. P. 177–180.
17. Eicken H., Lange M.A. Image analysis of sea-ice thin sections: A step towards automated texture classification // *Ann. Glaciol.* 1991. Vol. 15. P. 989–1009.
18. Eicken H., Bock C., Witting R. et al. Magnetic resonance imaging of sea-ice pore fluids: method and thermal evolution of pore microstructure // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2000. Vol. 31. P. 207–225.
19. Eicken H., Krouse H.R., Kadko D., Perovich D.K. Tracer studies of pathways and rates of meltwater transport through Arctic summer sea ice // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, iss. C10. DOI: 10.1029/2000JC000583.
20. Galley R.J., Else B.G.T., Geilfus N.-X. et al. Imaged brine inclusions in young sea ice – Shape, distribution and formation timing // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2015. Vol. 111. P. 39–48.
21. Golden K.M., Eicken H., Hiaton A.L. et al. Thermal evolution of permeability and microstructure in sea ice // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34, N 16. L16501. DOI: 10.1029/2007GL030447.
22. Hunke E.C., Notz D., Turner A.K., Vancoppenolle M. The multiphase physics of sea ice: a review of model developers // *Cryosphere*. 2011. Vol. 5. P. 989–1009.
23. Menzel M.I., Han S.-I., Stapf S., Blümich B. NMR characterization of pore structure and anisotropic self-diffusion in salt water ice // *J. Magn. Reson.* 2000. Vol. 143, N 2. P. 376–381.
24. Mercier O.R., Hunter M.W., Callaghan P.T. Brine diffusion in first-year sea ice measured by Earth's field PGSE-NMR // *Cold Reg. Sci. Tech.* 2005. Vol. 42, N 2. P. 96–105.
25. Morey R.M., Kovacs A., Cox G.F.N. Electromagnetic properties of sea ice // *Cold Reg. Sci. Tech.* 1984. Vol. 9, N 1. P. 53–75.
26. Notz D., Worster M.G. Desalination processes of sea ice revisited // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2009. Vol. 114. C05006. – <https://doi.org/10.1029/2008JC004885>.
27. Perovich D.K., Gow A.J. A quantities description of sea ice inclusions // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1996. Vol. 101, N C8. P. 18327–18343.
28. Perovich D.K., Roesler C.S., Pegau W.S. Variability in Arctic sea ice optical properties // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1998. Vol. 103, N C1. P. 1193–1208.
29. Scott F., Feltham D.L. A model of three-dimensional evolution of Arctic melt ponds on first-year multiyear sea ice // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, N C12. DOI: 10.1029/2010JC006156.
30. Tait S., Jaupart C. Composition convection in a reactive crystalline mush and melt differentiation // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1992. Vol. 97, N B5. P. 6735–6756.
31. Wettlaufer J.S., Worster M.G., Huppert H.E. The phase evolution of young sea ice // *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24, N 10. P. 1251–1254.