

УДК 551.322

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОНИЦАЕМОСТИ, ПОРИСТОСТИ И МИКРОСТРУКТУРЫ МОРСКОГО ЛЬДА АМУРСКОГО ЗАЛИВА ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2022 г. Н. А. Мельниченко¹, *, А. В. Тювеев², **, А. Ю. Лазарюк³, ***,
Е. В. Кустова³, ****, П. О. Харламов⁴, *****

¹Дальневосточный федеральный университет,
г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, 690922 Россия

²Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, 690014 Россия

³Тихоокеанский океанологический институт имени Ильичева ДВО РАН,
г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, 690041 Россия

⁴Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24, 690091 Россия

*e-mail: melnichenko.na@dyfu.ru

**e-mail: anton.bdk@gmail.com

***e-mail: lazaryuk@poi.dvo.ru

****e-mail: kustova_e@poi.dvo.ru

*****e-mail: pkharlamov@ferhri.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 20.04.2022 г.

Приведены результаты изучения микроструктуры морского льда Амурского залива за период с 2013 по 2018 гг. по данным гидрологических наблюдений и данным магнитно-резонансной томографии (МРТ), а также результаты расчетов эффективной и общей пористости и проницаемости льда и их взаимосвязи. Рассчитаны профили и средние значения проницаемости льда и числа Рэлея по данным измерений температуры и солёности с учетом общей и эффективной пористости. Проведено сравнение с результатами исследования этих же характеристик для льдов полярных районов. Рассмотрены значения порога проницаемости и критического числа Рэлея для льда Амурского залива. Представлены МРТ-изображения кернов с различными характеристиками проницаемости и значениями числа Рэлея.

Ключевые слова: морской лёд, микроструктура льда, проницаемость, гравитационный дренаж, магнитно-резонансная томография

DOI: 10.31857/S0030157422040165

ВВЕДЕНИЕ

Внутренняя структура морского льда и динамика рассола в нем имеют тесную взаимосвязь. Кроме того, количество и пространственное расположение рассола в толще морского льда связано с балансом тепла и массы льда. Процессы образования и движения рассола во многом ответственны за опреснение растущего льда и, соответственно, осолонение подледных вод, за перенос сквозь толщу льда биогенных элементов и т.д. Эти процессы тесно связаны с проницаемостью морского льда, которая зависит от его пористости. Пористость, т.е. включения газа и рассола в морском

льду, сильно зависит от температуры и солёности льда и, следовательно, от температуры воздуха и солёности морской воды. Количество и распределение включений во льду влияют на потоки тепла, соли, газа и пр. между океаном и атмосферой, меняют оптические, тепловые, электромагнитные и другие свойства морского льда [8, 10, 16].

При исследованиях свойств морского льда, в частности, его пористости, как правило, определяют количество рассола, газовым включениям посвящено меньше исследований. Традиционно предполагалось, что большая часть газа в морском льду растворена в рассоле, свободный его

объем незначителен по сравнению с объемом рассола. Например, в работе Назинцева и Панова [4] и других работах относительный объем рассола принимают как пористость.

Кроме того, подавляющее большинство исследований морского льда и его структуры посвящены льдам полярных районов либо выращенным искусственно в лабораторных условиях. Свойства льдов в прибрежных районах с умеренно-холодным климатом во многом отличны от свойств льдов Арктики [3]. Исследования проницаемости морского льда и динамики рассола в его толще на акватории Амурского залива могут быть полезны для исследований закономерностей эволюции слоистой термохалинной структуры вод и в других мелководных бухтах и заливах в холодный период года [2] и для климатических расчетов и моделирования.

Различные аспекты формирования пористости и проницаемости льда и их взаимосвязи рассматривались в [5, 12–15] и ряде других работ, но эти процессы, как отмечают многие авторы, до сих пор остаются недостаточно изученными. В то же время зависимость проницаемости льда от его пористости может служить инструментом при изучении состояния ледяной поверхности. В [11] предложено рассматривать процессы формирования проницаемости льда при помощи перколяционной модели, в соответствии с которой лед рассматривается как пористая среда со структурой, схожей с песчаником.

Последние исследования показывают, что потеря соли морским льдом, наблюдаемая в периоды роста и потепления льда (до периода таяния), в полярных районах вызвана исключительно гравитационным дренажем. Он определяется толщиной льда, его проницаемостью и градиентом плотности между рассолом и подледной водой [6, 13, 17]. В указанных работах и ряде других для изучения процессов движения рассола во льду часто используется число Рэлея, связанное с пористостью и проницаемостью льда и позволяющее отследить начало гравитационного дренажа рассола [13].

В нашей работе представлены результаты расчетов пористости, проницаемости и числа Рэлея для льдов Амурского залива по данным гидрологических наблюдений. Проведено сравнение этих характеристик, рассчитанных по количеству содержания жидкой фазы и с учетом газовых включений. Приведены результаты изучения микроструктуры морского льда с использованием магнитно-резонансной томографии (МРТ) для наиболее характерных примеров поведения рассола. Задача работы заключалась в установлении закономерностей формирования пористости и связанной с ней проницаемости и дренажа рассола во льду Амурского залива.

МЕТОДЫ

Условия взятия кернов льда и измерений их температуры и солёности, а также МРТ-исследований приведены в [3]. Измерения на МРТ-изображениях проводились средствами программы Vidar Dicom Viewer 3.2.

Пористость льда ψ определяется отношением плотности льда к плотности бесполостного (монокристаллического) льда $(1 - \rho_i/\rho_0)$ [1, 4] и, в свою очередь, определяет его проницаемость Π , а также заметно влияет на число Рэлея Ra , которое характеризует устойчивость состояния жидкой фазы во льду.

В [9] приведены выражения для расчета проницаемости льда:

– с учетом только количества жидкой фазы:

$$\Pi(\psi_b) = 1.995 \times 10^{-8} \psi_b^{3.1}, \quad (1)$$

где ψ_b — относительный объем жидкой фазы (общая пористость), выраженный в долях;

– с учетом как количества рассола, так и газовых включений:

$$\Pi(\psi_a) = 0.063 \times 10^{-8} \psi_a^{1.6}, \quad (2)$$

где ψ_a — сумма относительного объема жидкой фазы и относительного объема газа, также выраженная в долях.

Число Рэлея было вычислено по формуле, приведенной в [13]:

$$Ra = (g \Delta \rho \Pi(\psi) h) / k \eta. \quad (3)$$

Здесь g — ускорение свободного падения, $\Delta \rho$ — разность между плотностью подледной воды и плотностью рассола в исследуемом слое льда, Π — проницаемость, рассчитанная по минимальному значению пористости в исследуемом слое льда для послойных расчетов [6], или средняя — при расчете среднего Ra , h — толщина исследуемого слоя, $k = 1.2 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ — коэффициент термической диффузии, $\eta = 2.25 \times 10^{-3} \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ — динамическая вязкость. Содержание рассола и газа рассчитывалось по измеренной температуре морского льда и объемной солёности с использованием уравнений Кокса и Уикса [7] для температуры льда ниже -2°C .

Таким образом, из представленных в [3] кернов льда для изучения были отобраны февральские керны, средняя температура которых не превышала -2°C , а за 2015–2017 гг. — только те керны, для которых были сделаны МРТ-снимки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены графики вертикальных профилей температуры, солёности и рассчитанные по ним профили числа Рэлея и проницаемо-

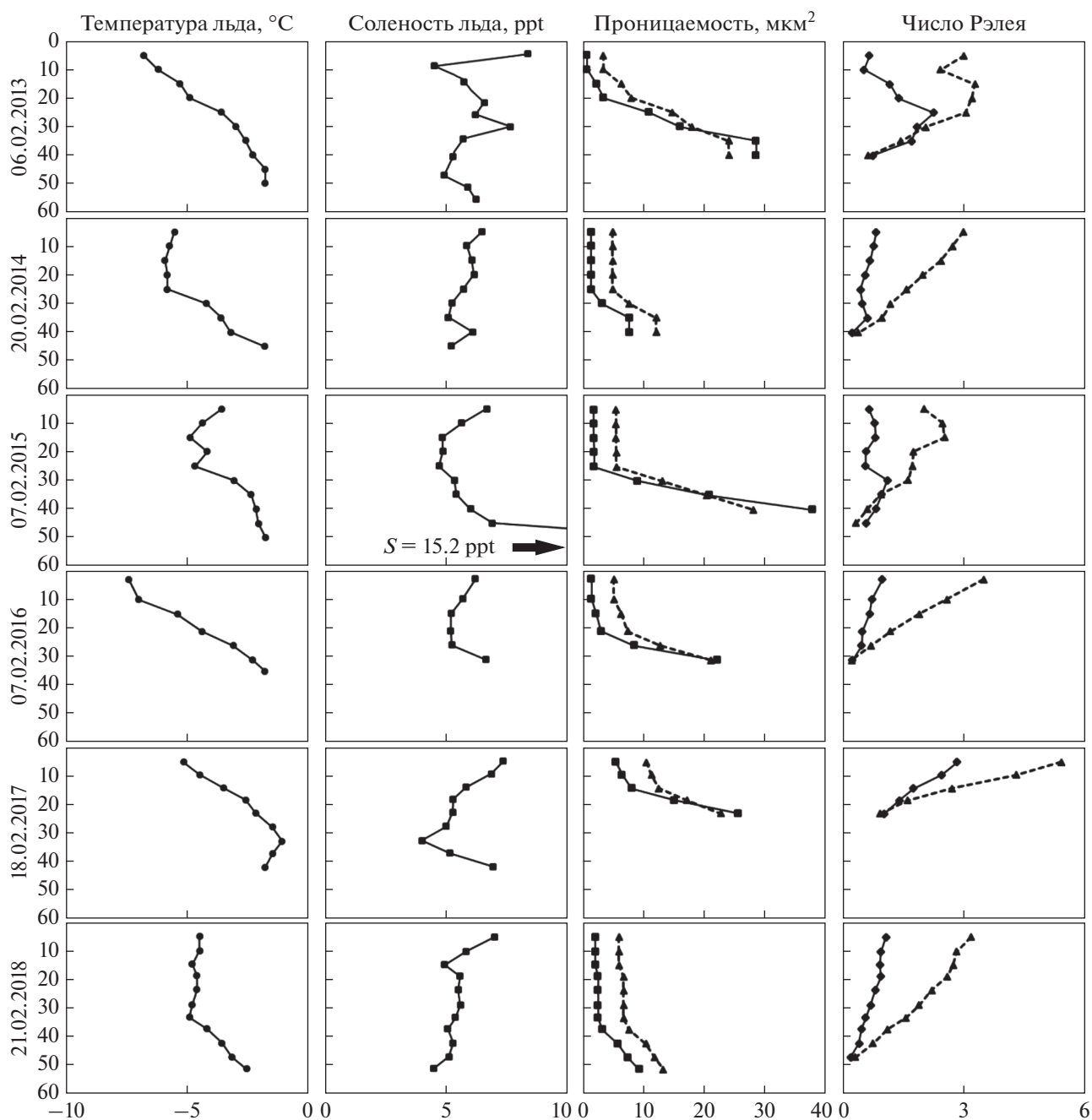


Рис. 1. Вертикальные профили температуры, солёности, проницаемости и числа Рэлея льда Амурского залива за период с 2013 по 2018 гг. Прерывистой линией обозначены результаты расчетов с учетом газовых включений.

сти льда по данным зимних наблюдений с 2013 по 2018 гг.

Профили температуры льда определяются предысторией температуры воздуха и другими метеорологическими и гидрологическими факторами. Они близки к линейным в наблюдениях, проведенных в 2013, 2016 и 2017 гг., и, в некоторой степени, схожи с практически линейными профилями в припайных льдах залива Амундсена [6].

При этом в профиле температуры льда 2017 г. можно увидеть инверсию в припайных слоях. А вот в 2014, 2015 и 2018 гг. наблюдался заметный минимум в средних слоях.

Профили солёности характеризуются схожими значениями на верхних и припайных уровнях, с минимумами в центре льда почти во всех случаях. В 2017 г. в льде отмечен максимум температуры и минимум солёности на уровне 35 см, что

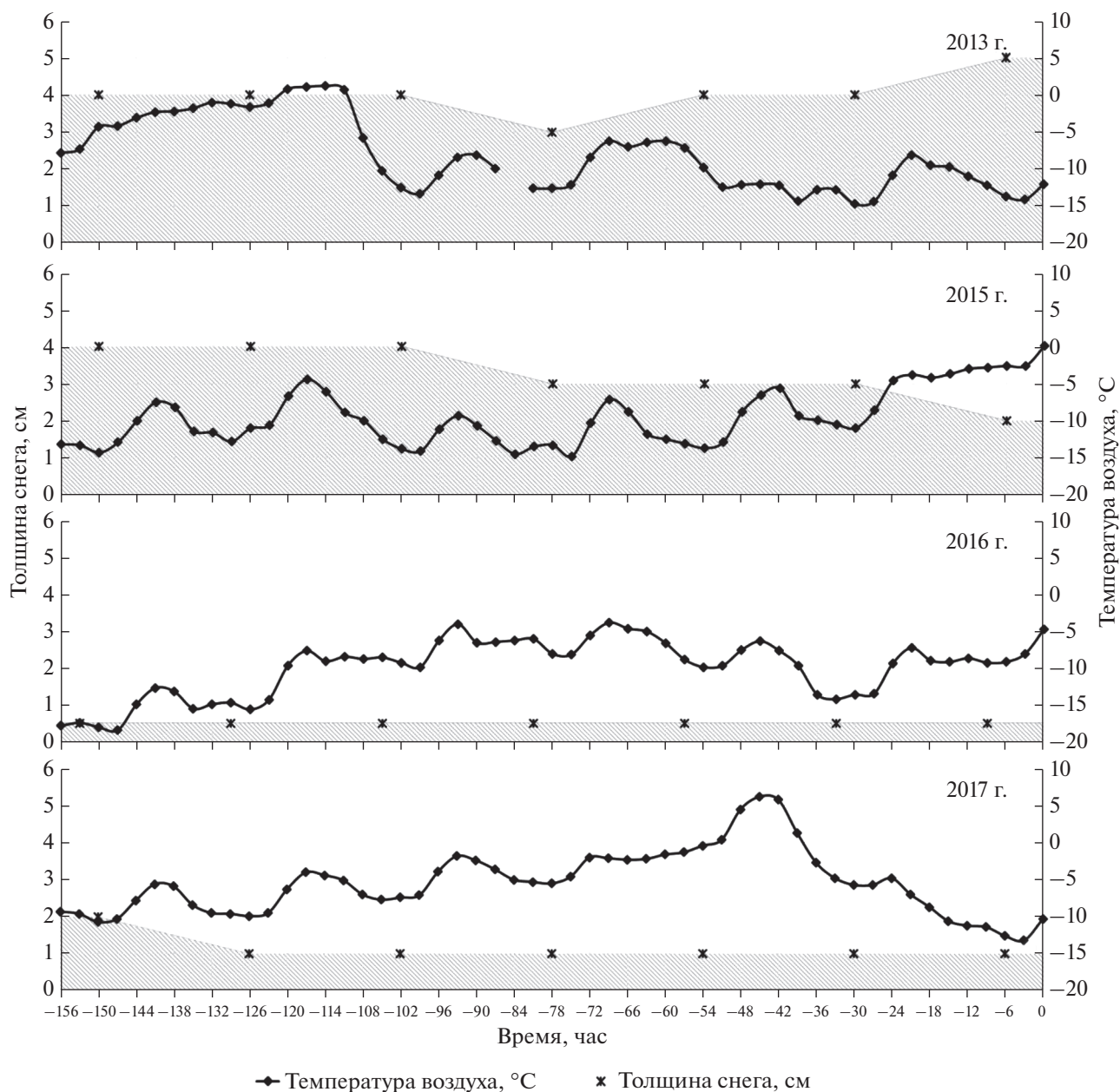


Рис. 2. Температура воздуха и толщина снежного покрова в периоды наблюдений (за ноль час принято время, ближайшее ко времени взятия керна) по данным метеостанции “Владивосток-Гора” (WMO ID = 31960, расстояние до места исследований – ~10 км) в 2013–2017 гг. по данным сайта (<https://rp5.ru/>).

может быть связано с сильной оттепелью (до $+6.2^{\circ}\text{C}$) за двое суток до взятия керна, а в 2015 г. наблюдался рост от -8.2°C (среднедневной температуры в предыдущие сутки) до -2.8°C в день взятия керна (см. рис. 2). Профили солености схожи с аналогичными профилями арктических летних льдов. Характерная для растущих арктических льдов С-образная форма профиля солености наблюдалась в 2015, 2016 и 2017 гг. Слоистая структура профиля солености наблюдалась в 2014 и 2018 гг. Приводные слои для всех представленных кернов характеризовались максимальными

или близкими к ним значениями солености, около 7 ppt. Исключением является керн 2015 г., где соленость в приводном слое достигала 15 ppt – что более чем в два раза превышает значения солености в другие годы. Однако, как можно увидеть из [3], повышенная соленость льда отмечена для всех кернов 2015 г., что может быть объяснено гидрологическими условиями в бухте Новик в этом году.

Профили проницаемости льда и числа Рэлея на рисунке 1 представлены в двух вариантах: рассчитанные по формулам (1) и (2) – с учетом газо-

Таблица 1. Значения общей и эффективной пористости, проницаемости и числа Рэлея, рассчитанные по формулам (1) и (2) для целого керна

Дата	Ψ_b , %	Ψ_a , %	$P(\Psi_b)$, мкм ²	$P(\Psi_a)$, мкм ²	$Ra(\Psi_b)$	$Ra(\Psi_a)$
06.02.2013	7.20	7.74	5.73	10.52	2.6	4.7
20.02.2014	6.15	6.55	3.51	8.06	1.9	4.4
07.02.2015	7.72	8.23	7.10	11.61	2.8	4.6
07.02.2016	5.75	6.11	2.85	7.21	1.3	3.4
18.02.2017*	8.26	8.86	8.75	13.07	3.0	4.5
21.02.2018	6.34	6.73	3.86	8.41	2.1	4.6

* Показатели рассчитывались для верхней части керна, где температура льда была ниже -2°C .

вых включений и без них. Из данных, приведенных на этом рисунке, можно увидеть, что послонная проницаемость льда $P(\Psi_a)$, рассчитанная по формуле (2) с учетом воздушных включений, как и следовало ожидать, больше проницаемости $P(\Psi_b)$, рассчитанной по формуле, учитывающей только объем жидкой фазы. При этом разница довольно значительна и в ряде наблюдений достигает 250%. Помимо этого, были рассчитаны эти же характеристики, но для целых кернов, по методу, который описывался в [13]. Результаты представлены в таблице 1.

Видно, что наибольшие значения пористости, проницаемости и $Ra(\Psi_b)$ были отмечены в 2015 и 2013 гг.; это могло быть связано с наличием более толстого, по сравнению с прочими годами исследования, снежного покрова, наблюдаемого визуально в месте выемки керна (в соответствии с данными метеостанции, см. рис. 2). Также высокие значения этих характеристик наблюдались в 2017 году, когда температура воздуха в предшествующий наблюдениям период претерпевала заметные изменения, как видно из данных метеонаблюдений, приведенных на рис. 2. При этом числа Рэлея, рассчитанные для кернов этих лет по формулам (1) и (2), отличаются друг от друга в меньшей степени, чем в прочие годы. Изменения $Ra(\Psi_a)$ повторяют изменения $Ra(\Psi_b)$ во всех случаях, кроме 2018 г., где наблюдается небольшое расхождение.

Содержание газа в кернах изменялось от 0.33% до 0.61%, наибольшие его значения также наблюдались в 2013, 2015 и 2017 годах. Содержание газа составляло 6–8% по отношению к содержанию рассола, что довольно-таки значительно и требует учета, тогда как в полярных льдах [6] объемная доля газа обычно незначительна по сравнению с объемной долей рассола в морском льду.

Для возникновения гравитационного дренажа число Рэлея должно превышать критическое значение. В [13], основываясь на экспериментальных исследованиях искусственно выращенного льда, определяли критическое значение $Ra = 10$.

В другом исследовании Карнат и др. [6] провели полевые исследования в Арктике (в южной части моря Бофорта и заливе Амундсена) в течение всего цикла роста – таяния льда. Число Рэлея было рассчитано по объему жидкой фазы. Авторы пришли к выводу, что в данном районе лед становится проницаемым и склонным к гравитационному дренажу на всю толщину при среднем числе Рэлея для керна, равном 3.

Согласно теории перколяции, порог проницаемости, при котором лед становится полностью проницаемым, был определен как 5% содержания рассола [12] для идеального, ровного столбчатого льда. Однако, поскольку проницаемость сильно зависит от микроструктуры, в [12] предполагалось, что для льдов с более сложной микроструктурой величина ее порога будет выше. В работе [6] для льдов, изученных в море Баффина, предполагают, что порог проницаемости находится в диапазоне 5–7%.

Как видно из таблицы, содержание рассола во льду Амурского залива находилось в этих же пределах, за исключением кернов 2013, 2015 и 2017 гг., когда его значения становились выше 7%. Однако даже в 2013 и 2015 гг. не отмечалось значительного опреснения льда в период взятия керна, что может означать более сложную структуру местных льдов, чем в исследовании [6] и, соответственно, более высокое значение порога проницаемости. Это также видно и из значений $Ra(\Psi_b)$, которое достигает 3 только в 2017 году.

На рисунке 3 представлены МРТ-изображения трех кернов, взятых в 2015, 2016 и 2017 гг. с указанием размеров слоев и отдельных прослоек. Светлые тона говорят о присутствии жидкости и показывают каналы рассола.

К сожалению, на МРТ-изображении керна 2016 г. не были захвачены верхние ~5 см, но можно предположить, что, как и в другие годы, в верхней части этого керна расположен зернистый лед. На снимках 2015 и 2017 гг. слой зернистого льда составляет 49.8 мм и 53.9 мм соответственно. Как известно, такой лед образуется на начальных этапах роста морского льда в результате смерзания

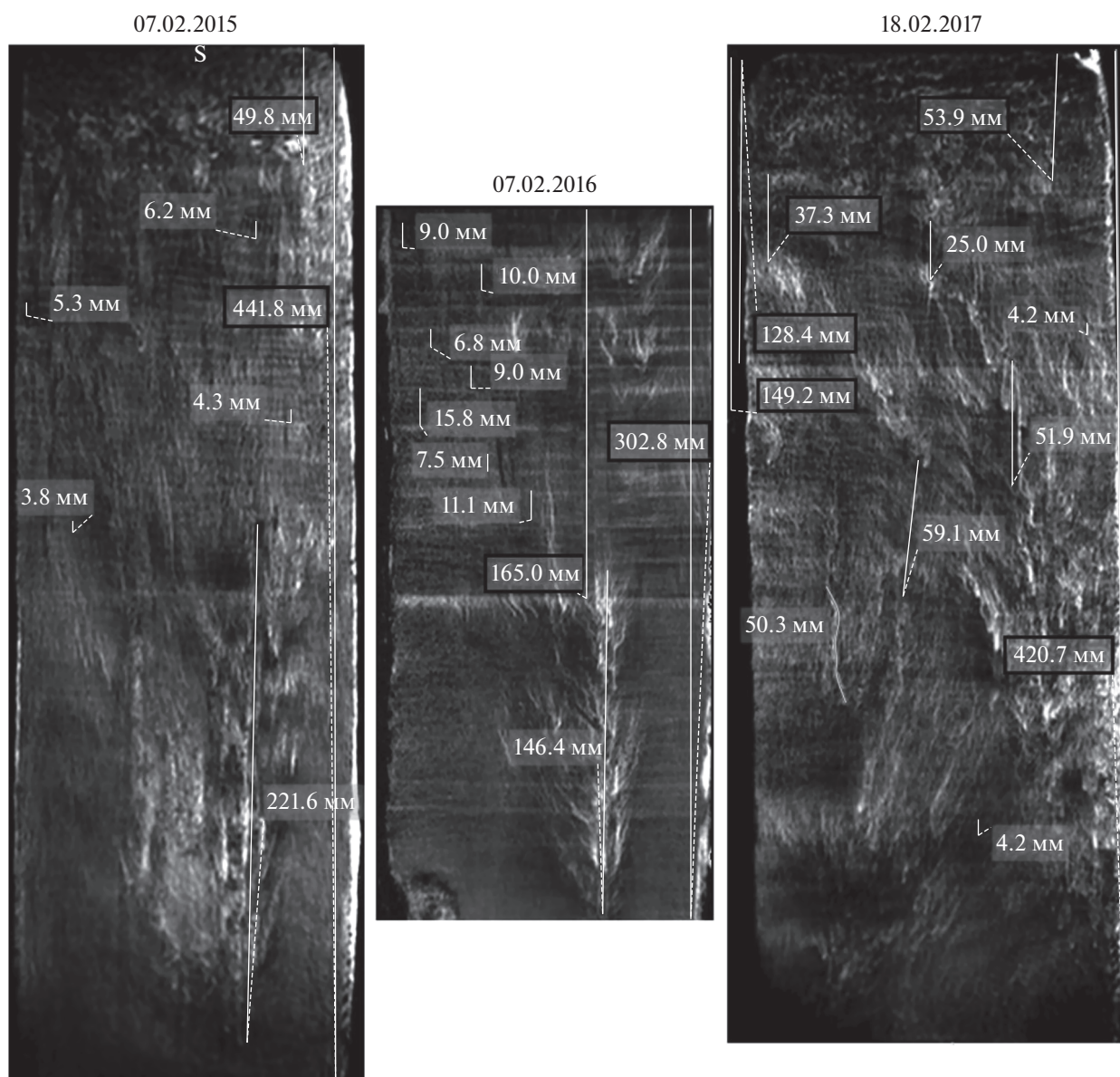


Рис. 3. МРТ-изображения кернов льда Амурского залива, взятых в 2015–2017 гг.

начальных форм льда. Далее, под воздействием конжеляционных процессов, как правило, образуется столбчатый лед. Однако на снимке 2017 г. заметно, что под слоем зернистого льда расположен слой более плотного льда толщиной 37.3 мм, отделенный более светлыми полосами от зернистого и конжеляционного льда.

На всех снимках присутствуют чередующиеся темные и светлые полосы, отмечающие слои более и менее плотного льда соответственно. Слои с малыми размерами по толщине близки к суточному приросту льда и, предположительно, формируются в результате смены дневных и ночных значений температуры.

На снимке 2015 г. эти слои имеют приблизительно равномерно уменьшающуюся толщину

(от 6.2 мм в верхнем слое столбчатого льда до 3.8 мм ближе к середине керна) и становятся практически неразличимы в нижней половине керна. Эта структура предположительно связана с погодными условиями с относительно стабильным суточным ходом температуры в период начального роста льда. Механизмы образования и структура этих слоев требуют дальнейшего изучения.

На керне 2016 г. эти слои мало заметны на фоне более ярко выраженных и более толстых слоев, образовавшихся из-за значительных неперiodических колебаний температуры: в декабре 2015 г. и начале января 2016 г. отмечались перепады более 10°C с переходом через 0°C. Особенно ярко выраженный слой расположен на уровне 165 мм. Схожая картина наблюдалась в микроструктуре

керн 2017 г., на МРТ-снимке которого можно выделить довольно яркие полосы на уровнях 128 и 149 мм. При этом изображение керн 2017 г. в целом выглядит гораздо менее структурированным, чем два других. Это можно объяснить наличием сравнительно толстого снежного покрова (рис. 2) и меньшим количеством резких перепадов температуры воздуха в период роста льда зимой 2017 г.

Следует отметить характерные особенности микроструктуры изображений кернов 2015 и 2016 гг., на которых наблюдаются ярко выраженные дендритоподобные дренажные каналы рассола, занимающие до половины толщи керн — 221.6 мм и 146.4 мм соответственно. Сходные, но менее выраженные структуры можно наблюдать и в верхней части кернов.

На снимке 2017 г. подобные структуры не выделяются; но наблюдаются хаотично распределенные изогнутые каналы длиной 5–6 см в средней и верхней частях керн. Нижняя половина керн (ниже 23 см от поверхности) имеет температуру выше -2°C , ее структура также выглядит хаотично, с неупорядоченными пятнами темного и светлого цветов (более и менее плотного льда). Можно предположить, что во льду произошел (или происходил в период взятия керн) конвективный сток рассола, и более темный слой льда под слоем зернистого на МРТ-изображении отражает структуру уже опресненного за счет гравитационного дренажа льда. В пользу этого предположения говорит среднее значение $Ra(\psi_b) = 3$ для этого керн, соответствующее критическому $Ra(\psi_b)$ по исследованию в Арктике [6]. При этом на снимке 2015 г. структура каналов стока рассола выглядит выраженной в меньшей степени, чем на изображении 2016 г., что может означать близость к порогу проницаемости. Число Рэлея $Ra(\psi_b) = 2.8$ для этого керн, что также близко к критическому.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных гидрологических и лабораторных исследований льдов Амурского залива с 2013 по 2018 гг. и анализа литературных данных видно, что пористость льда и связанная с ним проницаемость, как и следовало ожидать, преимущественно определяются объемной соленостью (рассолом) льда. Однако количество газовых включений также значительно и составляет 6–8% от количества рассола. Это является одним из отличий льда Амурского залива от полярных льдов, так же, как и в целом более высокая температура льдов.

Проницаемость, рассчитанная с учетом воздушных включений, по нашим расчетам может превышать проницаемость, рассчитанную только

с учетом количества жидкой фазы, более чем в два раза.

Порог проницаемости льдов Амурского залива превышает порог проницаемости арктических льдов и, предположительно, составляет 8% объемного содержания рассола. В пользу этого предположения свидетельствует отсутствие массовых стоковых процессов на МРТ-изображении керн 2015 г., при том что проницаемость этого керн составляет 7%.

Число Рэлея, рассчитанное по содержанию только жидкой фазы, соответствует расчетам [6]. Снимок керн 2017 г., где $Ra(\psi_b) = 3$, показывает процесс гравитационного дренажа, что соответствует выводам в работе [6] о критическом значении $Ra(\psi_b)$, рассчитанном для всего керн для льдов полярной области. Числа Рэлея $Ra(\psi_a)$, рассчитанные с учетом газовых включений, показывают согласованность с $Ra(\psi_b)$, однако превышают их в 2–2.5 раза в некоторых случаях.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания по теме № 121021700346-7 “Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик окраинных морей Азии и прилегающих районов Тихого и Индийского океанов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед // Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. С. 352–375.
2. Лазарюк А.Ю., Лобанов В.Б., Пономарёв В.И. Эволюция термохалинной структуры вод Амурского залива в холодный сезон // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2013. № 6 (172). С. 59–70.
3. 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. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574595859-869>
4. Назинцев Ю.Л., Панов В.В. Фазовый состав и теплофизические характеристики морского льда. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 84 с.
5. Büttner J. Permeability of young sea ice from microtomographic images. Dissertation. Geophysical University in Bergen, 2011. 107 p.
6. 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. V. 59. № 217. P. 819–837. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J148>
7. Cox G.F.N., Weeks W.F. Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice samples // J. Glaciol.

1983. V. 29. № 102. P. 306–316.
<https://doi.org/10.3189/S0022143000008364>
8. *Crabeck O., Galley R., Delille B. et al.* Imaging air volume fraction in sea ice using non-destructive X-ray tomography // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. P. 1125–1145. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1125-2016>
 9. *Freitag J.* The hydraulic properties of Arctic sea ice-implication for the small-scale particle transport. PhD Dissertation, University Bremen // *Ber. Zur Polarforsch.* 1999. V. 325. 150 p.
 10. *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. V. 111. P. 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.12.011>
 11. *Golden K.M., Ackley S.F., Lytle V.I.* Percolation phase transition in sea ice // *Science*. 1998. V. 282 (5397). P. 2238–2241. <https://doi.org/10.1126/science.282.5397.2238>
 12. *Golden K.M., Eicken H., Heaton A.L. et al.* Thermal evolution of permeability and microstructure in sea ice // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34(16). L6501. <https://doi.org/10.1029/2007GL030447>
 13. *Notz D., Worster M.G.* Desalination processes of sea ice revisited // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2009. V. 114. C05006. <https://doi.org/10.1029/2008JC004885>
 14. *Petrich C., Eicken H.* Growth, structure and properties of sea ice // *Sea ice*. 2010. Willey-Blackwell, Oxford. P. 23–77.
 15. *Petrich C., Langhorne P.J., Sun Z.F.* Modelling the interrelationships between permeability, effective porosity and total porosity in sea ice // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2006. V. 44. Iss. 2. P. 131–144. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2005.10.001>
 16. *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. V. 115. № C12. <https://doi.org/10.1029/2010JC006156>
 17. *Wettlaufer J.S., Worster M.G., Huppert H.E.* The phase evolution of young sea ice // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. № 10. P. 1251–1254. <https://doi.org/10.1029/97GL00877>

Relationship Between Permeability, Porosity and Microstructure of Sea Ice in Amur Bay Based on In-Situ Measurements and Magnetic Resonance Tomography

N. A. Melnichenko^{a, #}, A. V. Tyuveev^{b, ##}, A. Yu. Lazaryuk^{c, ###}, E. V. Kustova^{c, ####}, P. O. Kharlamov^{d, #####}

^a*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russky Island, 10 Ajaks Bay, 690922 Russia*

[#]*e-mail: melnichenko.na@dyfu.ru*

^b*Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Gogolya-st., 41, 690014 Russia*

^{##}*e-mail: anton.bdk@gmail.com*

^c*V.I. Il'yichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, ~~Baltiyskaya~~-st., 43, 690041 Russia*

^{###}*e-mail: lazaryuk@poi.dvo.ru*

^{####}*e-mail: kustova_e@poi.dvo.ru*

^d*Far Eastern Regional Research Hydrometeorological Institute, Vladivostok, Fontannaya-st., 24, 690091 Russia*

^{#####}*e-mail: pkharlamov@ferhri.ru*

The results of the study on microstructure of the fast sea ice in the Amur Bay for the period from 2013 to 2018 based on hydrological observations and magnetic resonance imaging (MRI) are presented, as well as the results of calculations of the ice cores' effective and total porosity and permeability and their relationship. Profiles and average values of ice permeability and Rayleigh number are calculated from temperature and salinity measurements taking into account the cores' total and effective porosity. A comparison with the results of a study of the same characteristics for ice in the polar regions is made. The values of the permeability threshold and the critical Rayleigh number for the ice of the Amur Bay are discussed. MRI images of the cores with different permeability characteristics and Rayleigh numbers are presented.

Keywords: sea ice, ice microstructure, permeability, gravity drainage, magnetic resonance imaging