

**МИКРОСТРУКТУРА МОРСКОГО ЛЬДА б. НОВИК ПО ДАННЫМ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
И РЕЗУЛЬТАТОВ МРТ-ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Н.А. Мельниченко¹, А.В. Тювеев², А.Ю. Лазарюк³, Е.В. Кустова³,
П.О. Харламов³**

¹Дальневосточный федеральный университет,
690091, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.

e-mail: melnichenko.na@dvfu.ru,

²Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: anton.bdk@gmail.com

³Тихоокеанский институт океанологии РАН имени Ильичева,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43,

e-mail: lazaryuk@poi.dvo.ru, kustova_e@poi.dvo.ru,
pkharlamov@poi.dvo.ru

В работе представлены результаты расчетов пористости, проницаемости и числа Рэлея для льдов бухты Новик по данным гидрологических наблюдений. Приведены результаты изучения микроструктуры кернов морского льда с использованием магнитно-резонансной томографии для наиболее ярких примеров поведения рассола. Задача работы заключалась в установлении закономерностей формирования пористости и связанной с ней проницаемости и дренажа рассола морского льда б. Новик.

Динамика рассола внутри морского льда имеет тесную связь с его микроструктурой, т.е., пористостью и расположением дренажных каналов. Осолонение вод в период образования льда, как и опреснение растущего и близкого к таянию морского льда также во многом определяется процессами перемещения рассола в толще льда. Кроме того, распределение рассола влияет на перенос веществ, необходимых для поддержания жизни во льду, на образование очагов биоактивности.

Эти процессы зависят, в первую очередь, от проницаемости морского льда Π , которую рассчитывают исходя из его пористости ψ . Под пористостью принято понимать совокупность включений газа и рассола во льду; она зависит от температуры и солености льда. При условии пренебрежения количеством твердых солей во льду (что при температурах льда выше $-8,2^{\circ}\text{C}$, характерных для исследуемых образцов, является разумным приближением), объем рассола рассчитывается по формуле [2]:

$$\psi_b = \frac{\rho_i S_i}{\rho_b S_b}$$

где ρ — плотность, S — соленость, с индексами для: i — льда, b — рассола. Соленость льда в данном исследовании представляет собой измеренную величину, остальные — расчетные.

Объем газовых включений был рассчитан по формуле [6]:

$$\psi_a = 1 - \rho_i \left(\frac{1 - S_i}{0,917} + \frac{4,98 \cdot S_i}{T} \right)$$

где T — температура льда, также измеренная.

Для расчета проницаемости Π льда использовались формулы из [3]:

$$\Pi(\psi_b) = 1,995 \cdot 10^{-8} \psi_b^{3,1}$$

где ψ_b — относительный объем жидкой фазы (общая пористость) в долях.

$$\Pi(\psi) = 0,063 \cdot 10^{-8} \psi^{1,6}$$

где ψ — сумма относительного объема жидкой фазы и относительного объема газа, так же приведенная к долям.

Для определения начала гравитационного дренажа рассола в толще льда используется число Рэлея, которое зависит от проницаемости льда и вычисляется по следующей формуле [7]:

$$Ra = \frac{g \Delta \rho z \Pi(\psi)}{\kappa \mu}$$

здесь g — ускорение свободного падения, $\Delta \rho$ — разность между плотностью подледной воды и плотностью рассола в керне, $\Pi(\psi)$ — средняя проницаемость керна, h — толщина исследуемого слоя (керна), $k = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$ — коэффициент термической диффузии, $\eta = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ — динамическая вязкость.

Таблица. Значения объема жидкой фазы и газовых включений, проницаемости и числа Рэлея для кернов разных годов.

Дата	$\psi_b, \%$	$\psi_a, \%$	$\Pi(\psi_b), \text{ мкм}^2$	$\Pi(\psi), \text{ мкм}^2$	$Ra(\psi_b)$	$Ra(\psi)$
06.02.2013	5,80	1,00	2,92	8,54	1,8	5,4
20.02.2014	6,07	1,07	3,38	9,25	2,1	5,7
07.02.2015	7,51	1,23	6,51	12,75	2,9	5,7
07.02.2016	5,70	1,03	2,77	8,38	1,5	4,4
18.02.2017*	8,04	1,33	8,06	14,26	3,1	5,5
21.02.2018	6,23	1,07	3,65	9,57	2,3	5,9

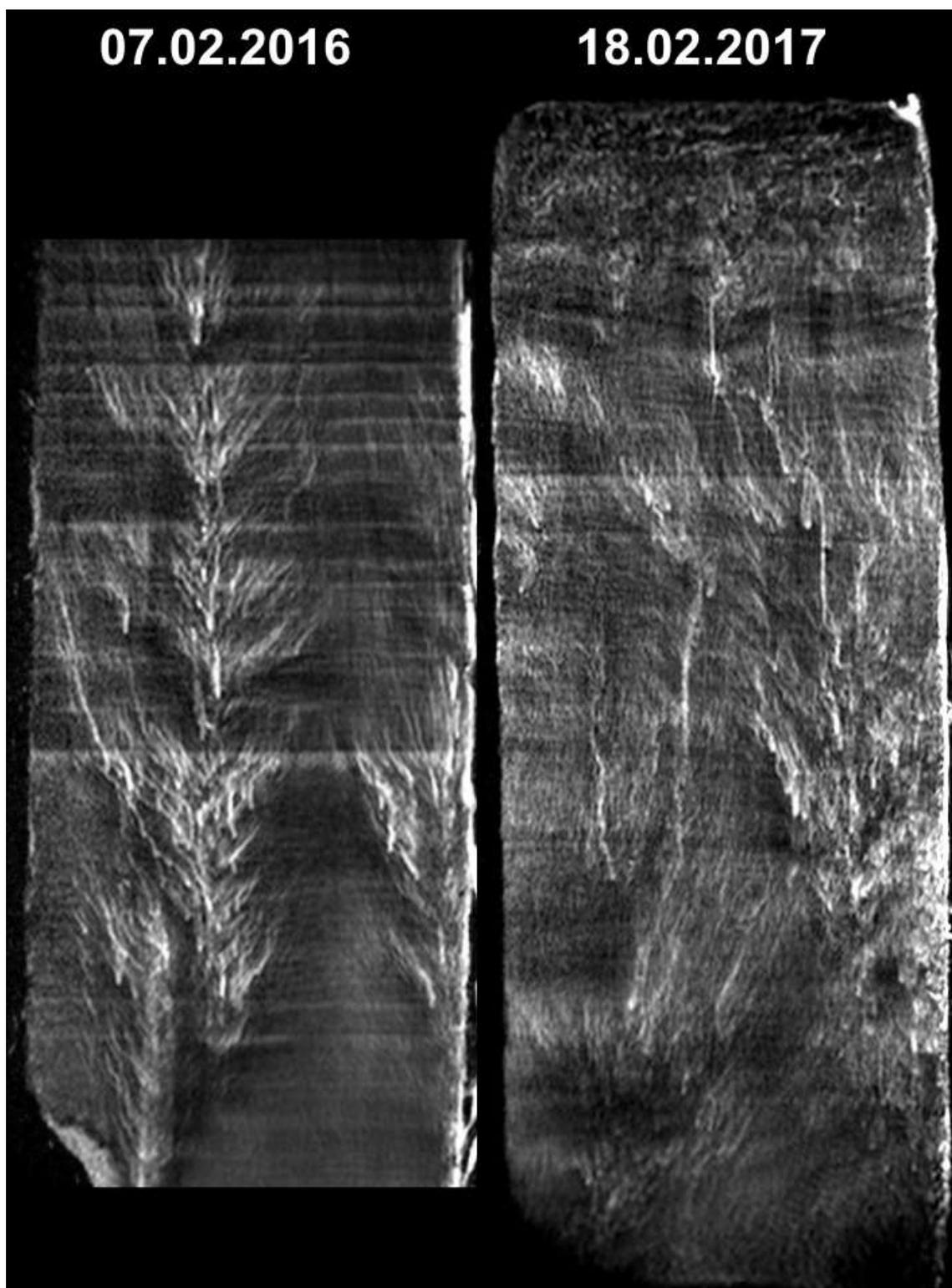
*Показатели рассчитывались для верхней части керна, где температура льда была ниже -2°C

Из таблицы можно увидеть, что наибольшие значения пористости, проницаемости и $Ra(\psi_b)$ наблюдались в 2015 и 2017 году; средние температуры льда (не показано) в эти годы также были больше, чем в остальные. В 2015 г. нагрев керна мог произойти снизу, от воды, за счет снежной зимы: практически весь холодный период до выемки керна лед был покрыт относительно толстым (4–10 см) слоем снега, который служил теплоизоляцией. В 2017 г. за 42 часа до срока выемки керна наблюдалась сильная оттепель, температура воздуха достигала $+6,2^\circ\text{C}$ и держалась выше 0°C более 12 часов (по данным сайта <https://rp5.ru/> «Расписание погоды»).

Гравитационный дренаж рассола в морском льду возникает при условиях, характеризующихся критическим числом Рэлея. В [5] критическое число Рэлея для морского льда оценивается авторами как $Ra = 10$. Однако, в этом исследовании лед был выращен искусственно в контролируемых условиях. В [1] были проведены полевые исследования в море Баффина в течение всего цикла растаяния льда. По результатам этих исследований авторы пришли к выводу, что число Рэлея для полярных льдов, рассчитанное по объему жидкой фазы, равно 3. Как видно из таблицы, среди исследованных кернов только для одного (2017 г.) число Рэлея, рассчитанное по количеству жидкой фазы, превышает 3. МРТ-изображение этого керна (см. рисунок) показывает неупорядоченную структуру льда, которая соответствует процессу гравитационного дренажа рассола.

Числа Рэлея, рассчитанные с учетом газовых включений $Ra(\psi_a)$, в целом показывают согласованность с $Ra(\psi_b)$, однако значение критического числа Рэлея,

рассчитанное таким способом, требует дальнейшего изучения.



МРТ-изображения кернов льда: 2016 г. – упорядоченная структура с каналами стока рассола;
2017 г. – хаотическое распределение рассола, неупорядоченная структура.

Порог проницаемости, при котором лед становится полностью проницаемым, был определен в 5% содержания рассола [4] для идеального, ровного столбчатого льда. В работе [1] для льдов, изученных в море Баффина, авторы предлагают порог проницаемости в диапазоне 5-7%. Значения жидкой фазы в исследованных ядрах льдов бухты Новик соответствуют величинам, полученным [1] для майских припайных льдов моря Баффина (~6-7%), в двух

случаях из шести эти значения были превышены (в 2015 и 2017 гг.), при этом на МРТ-снимках керна 2015 г. не наблюдалось заметного гравитационного дренажа, а число Рэлея не достигло критического значения и составило $Ra = 2,9$. Это говорит о возможно более высоком пороге проницаемости для льдов изучаемого региона. Поскольку при объеме рассола 7,5% на снимке керна 2015 г. не наблюдается массовых стоковых процессов, как на снимке 2017 г., однако число Рэлея близко к критическому, предполагается начало конвекционных процессов рассола. В керне 2017 г. содержание рассола составляет 8%, на МРТ-изображении явно виден процесс гравитационного дренажа, а $Ra = 3,1$. Т.о., порог проницаемости может составлять 8% объемного содержания рассола.

Литература

1. 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.
2. Cox G. F. N., Weeks W. F. Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice samples // Journal of Glaciology. – 1983. – Т. 29. – №. 102. – С. 306-316.
3. Freitag J. The hydraulic properties of Arctic sea ice-implication for the small-scale particle transport. PhD Dissertation, University Bremen // Ber. Zur Polarforsch. 1999. Vol. 325. P. 150.
4. Golden K.M., Eicken H., Heaton A.L. et al. Thermal evolution of permeability and microstructure in sea ice // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34(16). L6501
5. 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>
6. Schwerdtfeger P. The thermal properties of sea ice // Journal of Glaciology. – 1963. – Т. 4. – №. 36. – С. 789-807.
7. Vancoppenolle M. et al. On the use of the mushy-layer Rayleigh number for the interpretation of sea-ice-core data // The Cryosphere Discussions. – 2013. – Т. 7. – №. 4. – С. 3209-3230.