

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ МОРСКОГО ЛЬДА СРЕДСТВАМИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

**Кустова Е.В.¹, Лазарюк А.Ю.¹, Харламов П.О.²,
Тювеев А.В.³, Мельниченко Н.А.⁴**

¹Тихоокеанский океанологический институт РАН имени Ильичева, г. Владивосток,
lazaryuk@poi.dvo.ru, kustova_e@poi.dvo.ru

²Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток, pkharlamov@ferhri.ru,

³Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
г. Владивосток, anton.bdk@gmail.com

⁴Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс
melnichenko.na@dvvfu.ru

Для изучения преимуществ и недостатков применения средств компьютерной томографии (КТ) к определению плотности морского льда были отобраны 4 керна льда Амурского залива зимой 2021 г.: два керна 4 февраля в точке Т4 (и Т4b) на расстоянии не более 100 метров друг от друга; два керна 2 марта в точках Т5 и Т21, отстоящих друг от друга более, чем на 9 км. Кроме того, точка Т21 расположена в области влияния стока реки Раздольной (точки являются станциями гидрологического разреза). Т.о., в первом случае образцы представляли собой лед, образовавшийся и существовавший в схожих условиях, а во втором — в максимально различных. Диаметр кернов составил 16 см, что уменьшило вероятность извлечения образца без солевых каналов вследствие их неравномерного распределения во льду [1]. Кроме того, на каждой станции так же извлекался дополнительный керн для получения профиля температуры льда (через 5 см, считая от верхней поверхности керна) при помощи цифрового измерителя температуры ИТ-7Pt-2 (погрешность $\pm 0,2$ °С), и, в дальнейшем — профиля солености при помощи проточной системы зонда SBE-19 (точность определения солености $\pm 0,1$ *psu* (*practical salinity units*)) уже в лабораторных условиях.

Полученные керны были доставлены в медцентр Профи-Клиник (г. Владивосток) упакованными в толстый полиэтилен и термоизоляционный контейнер, в горизонтальном положении для предотвращения вертикального стока рассола. Там керны были помещены в 64-срезовый мультиспиральный томограф SIEMENS Sensation 64 (источник рентгеновского излучения был установлен на 120 кВ и 255 мА для февральских кернов и на 80 мА для мартовских). Сканирование происходило при комнатной температуре (керны оставались запакованными в полиэтилен) и

занимало не более 15 с. Толщина аксиальных срезов была установлена 1 мм, расстояние между срезами — 0,7 мм. Февральские керны были помещены в томограф параллельно, мартовские — последовательно. Как видно из табл.1, разрешение полученных в феврале снимков гораздо меньше. Однако, несмотря на это, мода гистограмм этих кернов не отличается от моды гистограмм изображений мартовских кернов (–72 НУ, что приблизительно соответствует веществу плотностью 0,926 Мг/м³), а формы гистограмм аналогичны, что указывает на возможность проведения сравнительного анализа полученных результатов.

Таблица 1. Характеристики кернов и параметры полученных изображений.

Станция	Расстояние от берега, м	Толщина льда, см	Температура воздуха, °С	Размер пикселя, мм	Принятый объем вокселя, мм ³	Количество эффективных срезов
T4	1350	45	–11,5	0,830	0,482	600
T4б	1450	49	–12,7			652
T5	2050	52	–6,9	0,429	0,129	676
T21	11100	75	–5,9			1033

Плотность вещества на полученных изображениях рассчитывается из единиц Хаунсфилда (НУ) согласно линейной зависимости, полученной по данным, приведённым в [2]:

$$\rho = 0,9747 \cdot NU + 998,7337 \quad (1)$$

Для сравнения использовались так же теоретические расчеты плотности льда. По формуле Швертдфегера [3] плотность морского льда составляет:

$$\rho = \left(1 - \frac{V_a}{V}\right) \left(1 - \frac{4,56 \cdot S_i}{T}\right) \cdot 0,917 \quad (2)$$

Формула применима в диапазоне температур льда выше –8,2°С, плотность для льда со средней температурой –5,5 °С и средней соленостью 5 ‰ предлагается принять 0,915 Мг/м³, а соленость льда в формуле указана в долях.

По формуле Кокса [4] плотность морского льда:

$$\rho = \left(1 - \frac{V_a}{V}\right) \frac{\rho_i F_1(T)}{F_1(T) - \rho_i S_i F_2(T)} \quad (3)$$

где для расчетов было использовано $\rho = 0,923$ Мг/м³, $\rho_i = 0,917 - 1,403 \cdot 10^{-4} \cdot T^{\circ C}$ Мг/м³, значения F_1 и F_2 рассчитывались по

температуре льда с использованием коэффициентов, представленных в [3], S_i – соленость льда в ‰, в данной работе для расчета использовались psi .

Содержание воздуха $\frac{V_a}{V}$ для обеих формул было взято из результатов, полученных для КТ-изображений, т.к. формулы содержания воздуха в морском льду и его плотности у обоих авторов являются взаимозависимыми.

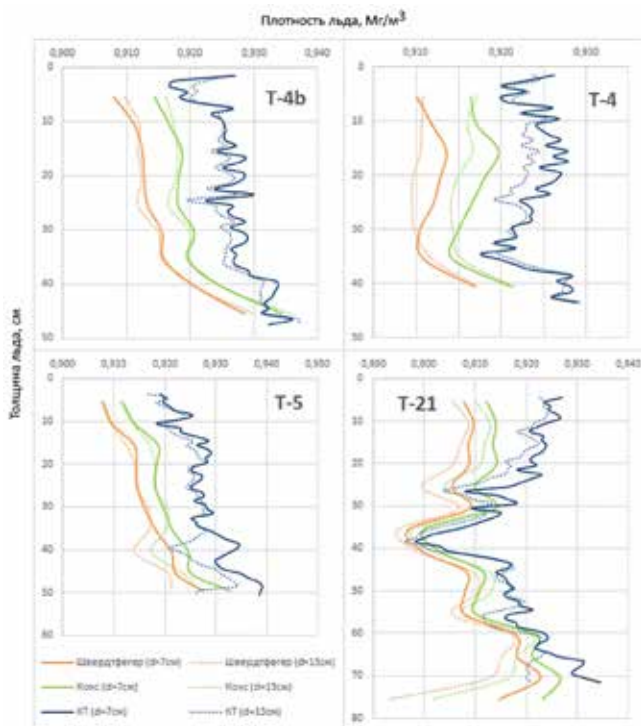
При расчетах по КТ-изображениям, с целью уменьшить влияние возможных потерь рассола при извлечении и транспортировке, были выделены две области исследования: диаметром 13 см ($d = 13$ см на рисунках, пунктирная линия) — чтобы обрезать края, где могли образоваться каверны и произойти сток рассола в связи с механическими повреждениями каналов, расположенных у края, и диаметром 7 см ($d = 7$ см на рисунках, сплошная линия) — захватывая, т.о., только центр изображения керна. Расчеты были произведены для обеих областей каждого керна. При осреднении на весь керн видно, что разница между средней плотностью всего керна и его центральной части составляет до $0,005 \text{ Мг/м}^3$ (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчета плотности морского льда

Керн	Средняя температура льда, °С	Средняя соленость льда, ‰	Средняя плотность льда по КТ, Мг/м ³		Средняя плотность льда по Коксу, Мг/м ³		Средняя плотность по льду Швердтфегеру, Мг/м ³	
			d=13 см	d=7 см	d=13 см	d=7 см	d=13 см	d=7 см
T-4	-5,2	6,4	0,923	0,924	0,916	0,917	0,911	0,912
T-4b	-5,8	6,5	0,926	0,927	0,919	0,919	0,914	0,914
T-5	-3,2	5,2	0,925	0,929	0,918	0,920	0,914	0,916
T-21	-2,8	4,6	0,913	0,918	0,905	0,909	0,902	0,906

Разница между результатами расчетов по КТ-изображениям и по формулам (2, 3) составляет (см. табл. 2) от $0,007 \text{ Мг/м}^3$ до $0,013 \text{ Мг/м}^3$, при этом разница с результатами расчетов по формуле Швердтфегера больше, чем по формуле Кокса. Профили плотности льда, полученные тем же образом, что и плотность для всего керна, показывают, что результаты, полученные по формулам (2, 3), в основном ниже результатов, полученных при прямом расчете по КТ-изображениям (рис. 1). Максимальные различия между ними составляют $0,012\text{-}0,016 \text{ Мг/м}^3$, и наблюдаются в верхних слоях кернов морского льда при расчетах по формуле (2). Также можно заметить обратную картину, когда плотности, полученные при расчетах по формулам, превышают плотность льда, полученную по результатам КТ-исследования. Такие случаи наблюдаются в самых нижних слоях кернов T4b и T21, а также в центральной части керна T21 при

Рис. 1. Профили плотности льда, рассчитанные по формулам (2, 3) с использованием натуральных данных, и полученные по результатам КТ-исследования



сравнении с расчетами по формуле (3). Это, предположительно, является следствием стока рассола в процессе извлечения и транспортировки кернов, а также (в случае с керном T21) результатом выхода физических параметров керна льда за пределы применимости формулы (3).

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 121021700346-7 «Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик окраинных морей Азии и прилегающих районов Тихого и Индийского океанов».

Литература

1. Cottier F., Eicken H., Wadhams P. Linkages between salinity and brine channel distribution in young sea ice // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1999. Т. 104. №. С7. С. 15859-15871.
2. Хофер М. Компьютерная томография: базовое руководство: Пер. с англ. / Под ред. Г.Е. Труфанова. М.: Мед, лит. 2006. 367 с.
3. Schwerdtfeger P. The thermal properties of sea ice // Journal of Glaciology. 1963. Т. 4. № 36. С. 789-807.
4. Cox G.F.N. and Weeks W.F. Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice samples // J. Glaciol. 1983. 29(12). P. 306-316.