

УДК 551.465

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССОЛА И ОБЪЕМНАЯ СТРУКТУРА ТОНКОГО ОДНОЛЕТНЕГО ЛЬДА АМУРСКОГО ЗАЛИВА ПО ДАННЫМ МЕТОДОВ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА И МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2019 г. Н. А. Мельниченко<sup>1\*</sup>, А. В. Тюевев<sup>1</sup>, А. Ю. Лазарюк<sup>2</sup>,  
В. Е. Савченко<sup>1</sup>, Е. В. Кустова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

<sup>2</sup> Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева,  
Дальневосточное отделение РАН, Владивосток, Россия

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

Поступила в редакцию 04.06.2015 г.

После доработки 04.10.2018 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

Изучено пространственное распределение жидкой и твердой фазы в порах однолетнего морского льда Амурского залива с использованием метода ядерного магнитного резонанса и магнитно-резонансной томографии в период с 2013 по 2016 г. Показано влияние снежного покрова на содержание рассола в порах морского льда, на объемную структуру кристаллических образований и на формирование его отдельных прослоек. Отмечено различие вертикальных профилей температуры и солёности для зимнего и весеннего периодов. Характерные особенности объемной кристаллической структуры и жидкой фазы в тонком однолетнем льду сопоставлены с толстыми льдами полярных районов. Приведено новое эмпирическое соотношение для расчета всей толщины и отдельных прослоек льда применительно к тонким молодым льдам.

**Ключевые слова:** морской лед, пространственная структура, методы ЯМР и МРТ

DOI: 10.31857/S0030-1574595859-869

Исследованию процессов формирования морского льда и его свойствам посвящено большое количество работ, перечисленных в известных монографиях, например [1, 2], и многочисленных тематических публикациях, полностью которые невозможно перечислить в рамках отдельной статьи. Интерес исследователей к особенностям формирования льда и содержанию в нем жидких и газообразных включений обусловлен тем, что от структуры льда зависит теплообмен через его поверхность. От содержания рассола и пористости льда зависит его прочность. Содержание рассола тесно связано с температурой воздуха, исходной солёностью морской воды (МВ), условиями его формирования, толщиной снежного покрова на поверхности и рядом других причин.

Структура льда изучалась различными методами. Например, оптическим, с фотографированием отполированных срезов кернов в поляризованном свете в различных спектральных диапазонах,

рентгеновским методом, измерениями диэлектрической проницаемости и другими методами [2]. При использовании рентгеновского метода для обеспечения контрастности добавляются химические реагенты, что неизбежно ведет к нарушению фазового равновесия в системе лед–вода. В [10] были выполнены теоретические расчеты проницаемости и соединимости ячеек льда с рассолом в поровом пространстве, но, как отмечают сами авторы, результаты их расчетов можно оценивать только как приближенные.

Лучшими методами изучения строения льда без использования предварительной обработки являются резонансные методы, такие как ядерно-магнитный резонанс (ЯМР), позволяющий определять содержание рассола без разрушения образца, и магнитно-резонансная томография (МРТ), дающие пространственную картину распределения твердой и жидкой фазы внутри объема льда. С помощью МРТ проведены исследования закономерностей распределения кана-

лов и пор по размеру, что было бы невозможно осуществить с помощью традиционных методов [6, 8–12]. В частности, этим методом установлены закономерности замерзания искусственной МВ и фазовый состав льда в бассейне довольно крупного размера (18,2×9,1×2,75 м) [9].

Ранее нами были проведены исследования процессов замерзания МВ в лабораторных условиях построением температурных зависимостей содержания рассола во льду при различных соленостях замерзающей МВ с использованием импульсного и стационарного методов ЯМР [3, 4]. В представленной работе показано вертикальное распределение жидкой фазы и объемной структуры натурального морского льда в зависимости от погодных условий с использованием стационарного метода ЯМР. Измерения интегральной интенсивности линий поглощения протонов в жидкой фазе были дополнены изображениями кернов льда с использованием МРТ. Была сделана попытка установить закономерности формирования прослоек и структуры льда в целом при резких перепадах температуры воздуха.

Пробы морского льда извлекались из припайного льда в одной и той же точке, координаты которой приведены на рис. 1. Была выбрана полузакрытая от ветров бухта Новик залива Петра Великого во время устойчивого формирования толщины льда, обеспечивающая безопасное передвижение по льду, примерно

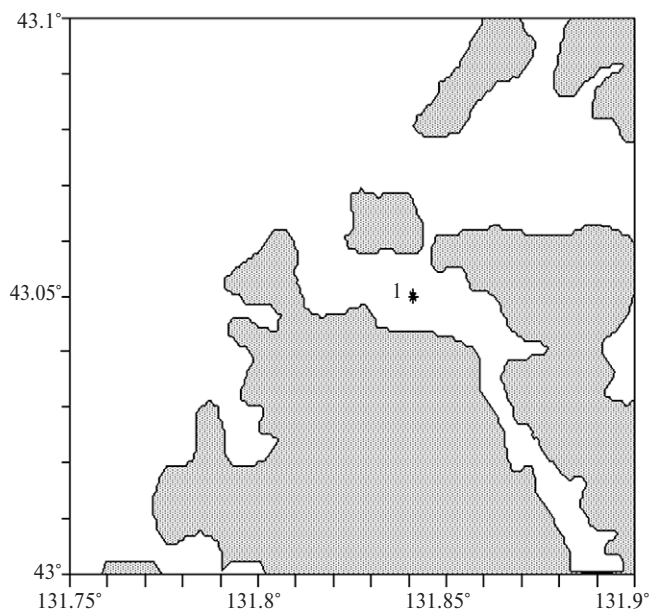


Рис. 1. Карта района исследований. Бухта Новик у берегов о. Русский.

в одни и те же календарные сроки. Выбор места наблюдения исключал ряд неконтролируемых факторов, присущих открытой части залива. После первых же экспериментов стало понятно, что тонкий однолетний лед толщиной порядка 40–55 см вследствие значительной динамики условий его формирования существенно отличается от толстых многолетних льдов полярных районов, которым посвящено большинство исследований.

Цель настоящей работы состояла в установлении закономерностей формирования жидких и кристаллических образований в объеме натурального морского льда под воздействием различных погодных условий на основе анализа МР-томограмм и метода ЯМР.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Относительное содержание жидкой фазы во льду  $Q_l$  определялось таким же образом, как и ранее [3–4], по соотношению:

$$Q_l = A_T / A_0, \quad (1)$$

где  $A_T$  и  $A_0$  — интегральные интенсивности линий поглощения в спектре ЯМР на протонах в жидкой фазе льда при температурах  $T$  отдельных участков керна льда и в растопленном льду при температуре, близкой к температуре замерзания. Изменение чувствительности метода вследствие изменения добротности контура при изменении температуры ( $Q$ -фактор) учитывалось с помощью заранее установленного коэффициента.

Для непосредственного определения  $Q_l$  в кернах льда необходима приемная катушка большого размера, превышающая диаметр керна. Однако на практике диаметр капилляров в стандартных спектрометрах ЯМР не превышает нескольких миллиметров. Поэтому нужно было либо сначала раздробить лед на мельчайшие кусочки с естественной потерей части рассола, либо растопить его, а потом уже охладить до температуры керна в момент его извлечения. Нами был выбран второй вариант с учетом небольших пределов изменения температуры льда (не ниже  $-10^\circ\text{C}$ ). Естественно, результаты определения  $Q_l$  во вновь замороженной морской воде и в изначальном льду могут отличаться, так как на формирование характеристик льда в естественных условиях влияет множество факторов. Подтверждением являются результаты расчетов относительного объема рассола по методу Коха и Вика [7].

В поддержку принятого решения служит и то обстоятельство, что содержание рассола в одинаковых по объему пробах льда из МВ одинаковой солености определяется температурой, причем выше эвтектической точки NaCl практически не зависит от направления изменения температуры [3, 4]. Следует особо подчеркнуть, что принятая нами методика применялась только для определения  $Q_i$  для чего использовался ЯМР спектрометр EV-400 фирмы Bruker на резонансной частоте протонов 400 МГц.

Из-за отсутствия сертифицированных электронных термощупов измерения температуры проводили в кернах, высверленных кольцевым буром диаметром 18 см, в лунках с шагом 5 см с помощью серии ртутных термометров от стандартных метеорологических психрометров с известными температурными поправками. Диаметр лунок составлял 8 мм, что соответствовало диаметру термометров, а их глубина 5 см. Для уменьшения погрешности измерений температуры из-за нагрева термометров солнечной радиацией или их охлаждения воздухом керны льда с термометрами защищались экранами. Для оценки влияния температуры воздуха на показания термометров за время измерений (~15 мин) замеры производились дважды: сначала от нижней поверхности льда, контактировавшей с подледной водой, а затем в обратном направлении после установления равновесия. Погрешность определения температуры льда составляла примерно 0.2 К. Для крупных кернов массой 11 кг изменение температуры не превышало указанную погрешность по истечении 40 мин.

Профили солености измерялись в кернах, распиленных на сегменты по 4–5 см. Распил производили при температуре атмосферного воздуха с соблюдением мер, исключающих потери жидкой фазы и попадания снежной массы в отобранные пробы льда. Распиленные сегменты помещали в пластиковые контейнеры с герметичной крышкой. Растапливали куски льда при комнатной температуре в тех же полиэтиленовых емкостях. Определение солености производили по электропроводности талой воды. Растопленную массу пропускали через проточную систему зонда SBE-19, откалиброванного на специальном стенде в ТИНРО (г. Владивосток). Объем талой воды составлял ~800 см<sup>3</sup>. Погрешность определения солености не превышала 0.1 епс. Результаты измерений солености отнесены к средним слоям сегментов керна.

МРТ изображения кернов льда были получены на медицинском томографе с индукцией

магнитного поля 0.4 Т (образцы 2013 г.) и 4 Т (образцы 2014–2016 гг.). Как известно, контраст изображений твердой и жидкой фаз основан на значительной разнице (5–6 порядков) времени релаксации протонов и коэффициентов диффузии молекул воды в твердой и жидкой фазах. Для предотвращения потерь жидкой фазы керны льда транспортировались в лабораторию в термостатированных контейнерах из пенопласта, заполненных сухим льдом.

Метеорологическая обстановка в районе проведения исследований за зимний период была заимствована с метеорологического сайта (<http://www.gp5.ru>), на котором приведены ежечасные наблюдения. Сравнение измеренной температуры воздуха, указанной на рисунках и приведенной на сайте, показало, что различием температуры воздуха в точке наблюдений на время производства наблюдений и на метеостанции можно пренебречь.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении пространственного распределения твердой и жидкой фазы льда выяснилось, что для весеннего периода 2013 г. характерна рыхлая структура, особенно нижних слоев, соприкасающихся с водой. Фигуры, соответствующие кристаллическим образованиям (светлый фон), имели неправильную форму и случайные размеры. Значительное количество жидкой фазы (темный фон) в керне льда было обусловлено предшествующим обильным снегопадом с последующей оттепелью и таянием снежной массы (рис. 2а). Также наблюдалось существенное различие профилей температуры, солености и содержания рассола в срединных слоях февральских и мартовских льдов. Максимум содержания жидкой фазы в срединном слое наиболее ярко был выражен в конце второй декады февраля (рис. 2б).

Из рис. 2б видно, что содержание жидкой фазы в направлении нижней части льда коррелирует с температурой воздуха и ее колебаниями за предшествующий период, а также с толщиной снежного покрова (рис. 2в). Значительные колебания солености и содержания рассола на графиках вертикального распределения связаны с влиянием таяния снежного покрова, особенно после обильных весенних снегопадов.

Отражение резких смен погоды на характере вертикального распределения твердой и жидкой фазы в морском льду наблюдались и в экспериментах 2014 г. (рис. 3а). В отличие от пропитанного

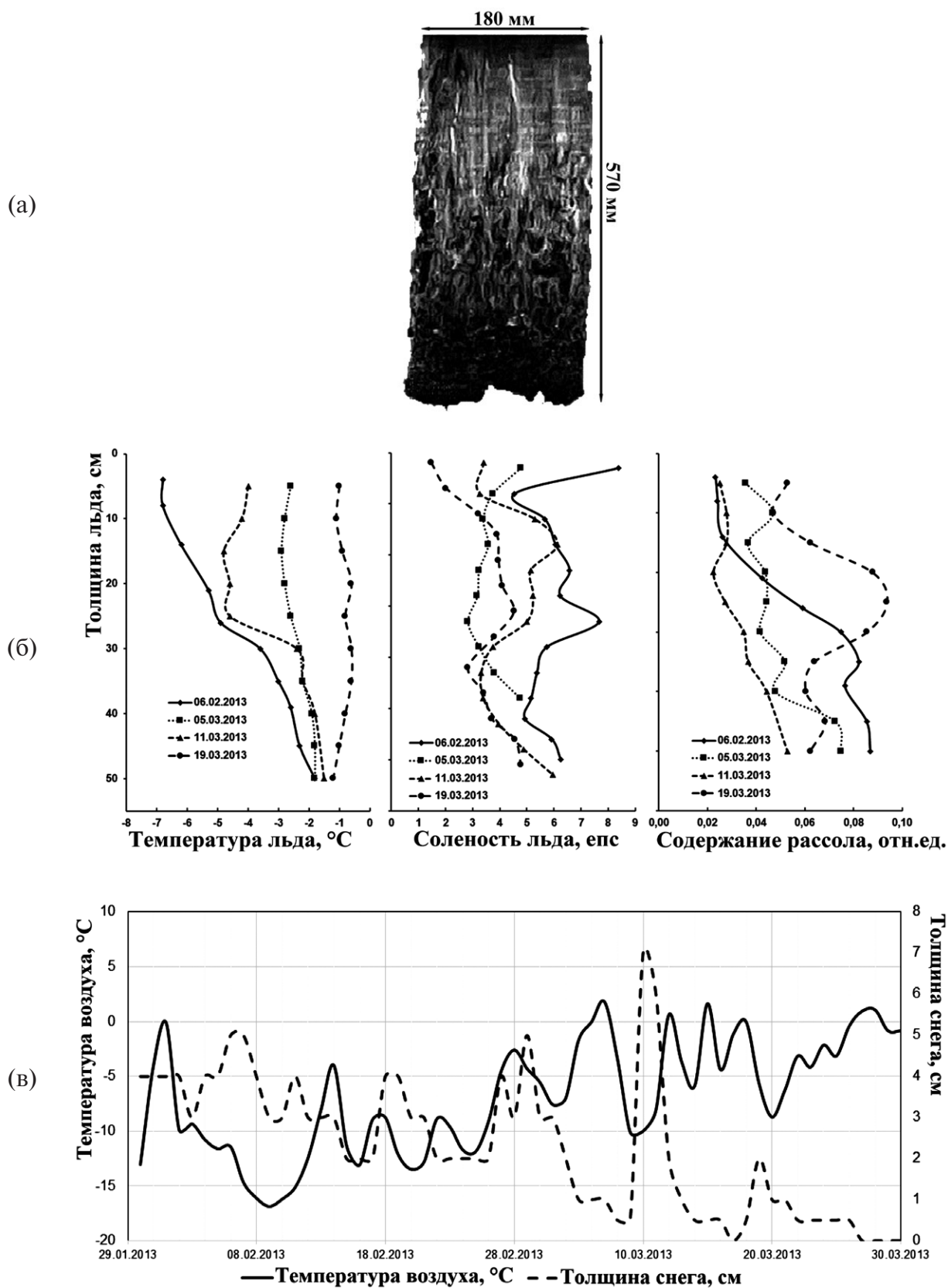


Рис. 2. (а) — МРТ керн льда, извлеченного 19.03.2013 г. (толщина льда 57 см, толщина снежного покрова 2 см, температура воздуха  $-2^{\circ}\text{C}$ ); (б) — вертикальное распределение температуры, солености и содержания рассола в 2013 г.; (в) — изменения температуры воздуха и толщины снежного покрова в январе–марте 2013 г.

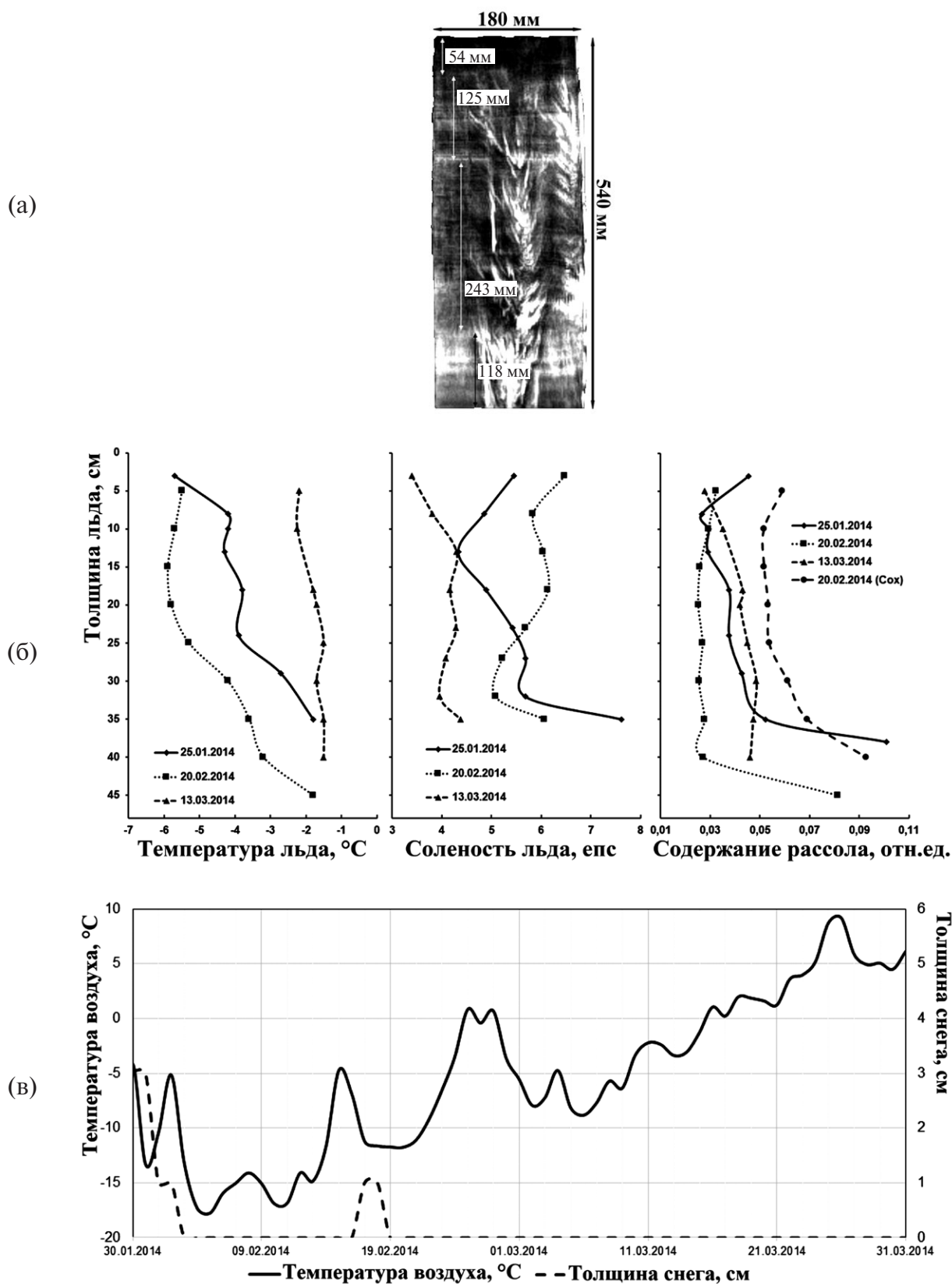


Рис. 3. (а) — МРТ керна льда, извлеченного 20.02.2014 г. (толщина льда 54 см, толщина снежного покрова 0 см, температура воздуха  $-6^{\circ}\text{C}$ ); (б) — вертикальное распределение температуры, солёности и содержания рассола в 2014 г. (Cox) — результаты вычислений по методу Cox & Weeks; (в) — изменения температуры воздуха и толщины снежного покрова в январе—марте 2014 г.

талым снегом весеннего льда 2013 г., зимний 55-сантиметровый лед 2014 г. не только имел разное максимальное содержание жидкой фазы в верхнем и нижнем слоях, но и отличался наличием прослоек, связанных с чередованием морозных дней и оттепелей. В каждом слое керна льда можно было наблюдать достаточно крупные кристаллические образования ветвистой структуры, напоминающие узоры на зимнем стекле. Характерно, что оси (или “стволы”) ветвей этих образований не совпадают друг с другом и смещены относительно центральной оси керна льда в каждом слое. По видимому, смещение связано с кривизной “стволов” и с переходом их осей в другие плоскости относительно диаметральных плоскостей, приведенных на изображениях кернов льда в данной работе.

Слоистая структура льда отражалась и на характере вертикального распределения температуры, солёности и жидкой фазы. Увеличение количества и солёности жидкой фазы в приводном слое обусловлено обменом с подледной водой. Графики вертикального распределения относительного объема рассола во льду, вычисленного по методу Cox & Weeks [7], подобны графикам относительного содержания жидкой фазы; указанные кривые практически параллельны (рис. 3б). Поскольку пористость льда пропорциональна содержанию рассола, на февральских графиках малоснежной зимы 2014 г. (рис. 3в) минимальные значения температуры, солёности и содержания жидкой фазы сглаживались при переходе к мартовским образцам.

Пространственная картина льда, сформированного к февралю 2015 г., когда отмечались обильные снегопады, представляла собой нечто среднее между строением льда предыдущих двух лет (рис. 2а, 3а). На фоне преобладающей жидкой фазы присутствовали малозаметные кристаллические образования волокнистой формы (рис. 4а). Вероятно, их образование в матрице льда происходит за счет случайных тепловых флуктуаций в результате естественных перепадов температуры воздуха и связанного с ними таяния снега накануне отбора проб (рис. 4б).

На графике вертикального профиля температуры для представительной пробы льда (07 февраля 2015 г.) примерно на уровне 15 см от поверхности существует минимум, после которого температура монотонно начинает расти (рис. 4б, сплошная кривая). В первой половине марта 2015 г. в период значительных снегопадов

(рис. 4в) характер вертикального распределения температуры сохранялся в пределах погрешности измерения. Превышение температуры льда относительно точки замерзания МВ можно объяснить инклюзией значительного количества талой снежной массы. Минимум температуры и солёности льда в срединном слое объясняется низкой температурой поверхности льда и более высоким ее значением в приводном слое, близким к температуре замерзания МВ. Соответствующий максимум в весенний период легко объяснить повышением температуры воздуха и поверхности льда.

Ниже уровня 15 см вплоть до приводного слоя в кернах льда отмечалось монотонное возрастание солёности. В приводном слое она превышала свои типичные значения вследствие обмена с подледной водой. Закономерности изменения содержания жидкой фазы во льду примерно соответствовали таковым и для солёности, что вытекает из соотношения, приведенного у Cox & Weeks [7].

Наиболее заметное расслоение в пространственном строении льда происходило в условиях «малоснежья» теплой зимы 2016 г. Толщина льда в начале февраля составляла всего 36,5 см, что значительно меньше, чем в те же календарные сроки предыдущих лет (54–57 см). Главной причиной возникновения отчетливых прослоек были резкие колебания температуры воздуха в январе и феврале, сильно отражавшиеся на структуре малозащищенного «снежной рубашкой» тонкого льда (рис. 5а). На рис. 5б приведены результаты распределений температуры, солёности и содержания рассола во льду, а на рис. 5в — соответствующие изменения температуры воздуха и толщины снежного покрова для этого периода года.

Ветвистую пространственную структуру льда, но ниже срединного слоя, наблюдали и в экспериментах с замораживанием искусственной МВ в бассейне [9]. Аналогичные картины кристаллических образований наблюдались на МРТ изображениях кернов, извлеченных из однолетних льдов в феврале 2017 и 2018 гг., что указывает на устойчивую тенденцию в формировании внутренней структуры льда.

Следует отметить, что слоистое строение льда, сформированного в течение одного сезона, ранее не отмечалось ни в экспериментах с замораживанием МВ в бассейне [9], ни в наблюдениях арктических льдов [6, 12]. Одной из возможных причин возникновения паттернов ветвистой

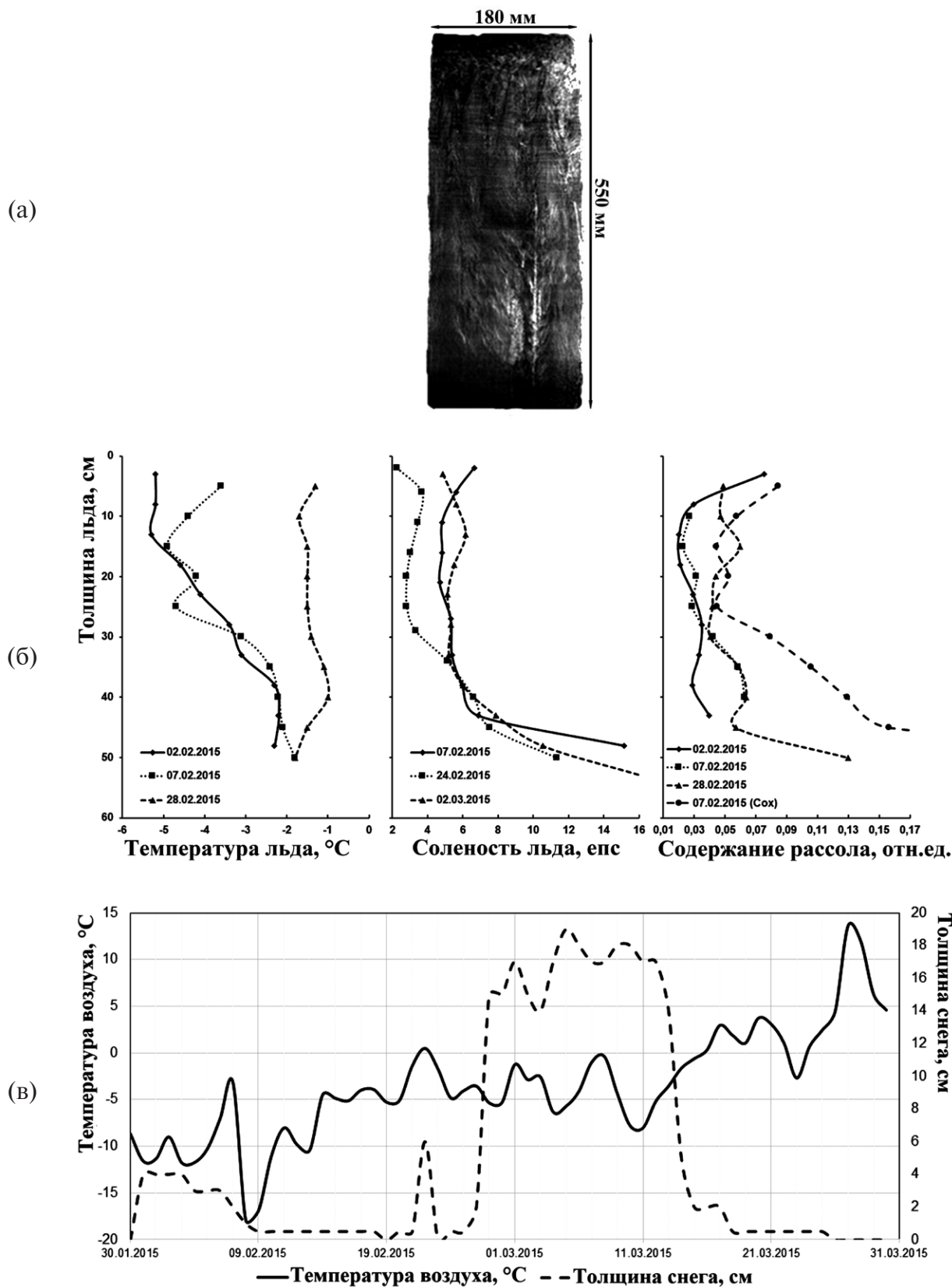


Рис. 4. (а) — МРТ керн льда, извлеченного 7.02.2015 г. (толщина льда 55 см, снежного покрова 2 см, температура воздуха  $-8^{\circ}\text{C}$ ); (б) — вертикальное распределение температуры, солености и содержания рассола в 2015 г. (Cox) — результаты вычислений по методу Cox & Weeks; (в) — изменения температуры воздуха и толщины снежного покрова в январе–марте 2015 г.

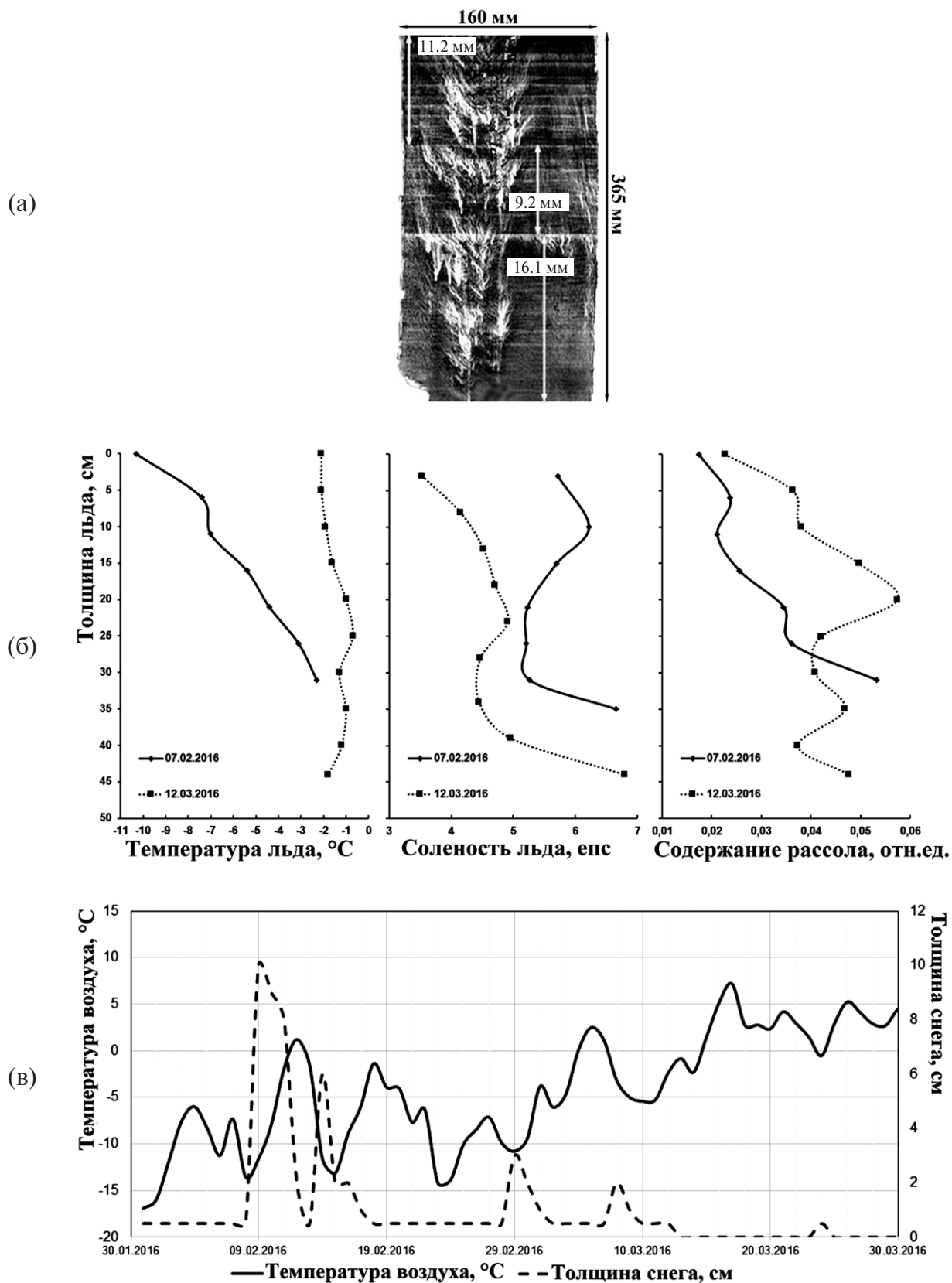


Рис. 5. (а) — МРТ керн льда, извлеченного 7.02. 2016 г. (толщина льда 36.5 см, снежного покрова 0.5 см, температура воздуха -9.1°C); (б) — вертикальное распределение температуры, солености и содержания рассола в 2016 г.; (в) — изменения температуры воздуха и толщины снежного покрова с конца декабря 2015 по март 2016 г.



структуры могут быть вертикальные движения рассола внутри льда, особенно в условиях отсутствия или малого количества снега, приводящих к значительной скорости нарастания льда.

Нами были предприняты попытки расчета толщины льда в Амурском заливе и сроков достижения любой заданной толщины по известным соотношениям на основе материалов натуральных наблюдений 2013–2016 гг. с использованием различных известных соотношений. Использование для расчетов громоздкой формулы Доронина [2] требует привлечения большого количества факторов, которые не всегда можно полностью учесть. Определенная по формуле Зубова (2) [1] дата достижения толщины льда ( $H = 36.5$  см) в 2016 г. на 7–8 дней опережала фактическую (с учетом весьма вероятной погрешности установления точной даты начала льдообразования с учетом эпизодических визуальных наблюдений).

$$H = -25 + \sqrt{(25 + H_0)^2 + 8E_t} . \quad (2)$$

К тому же расчетная толщина льда на 07 февраля 2015 г. составляла 40.9 см, что меньше экспериментального значения 55 см. Таким образом, сроки, на которые приходится определенное нарастание льда в бухте Новик ( $H$ ), рассчитанное по формуле (2), и сроки, когда оно зафиксировано реально, заметно разнятся.

Гораздо большее расхождение (~40%) с практикой наблюдалось в расчетах по формуле, вы-

веденной для ровных поверхностей полярных станций в Арктике [5], которая включала толщину снежного покрова:

$$H = -6.9h + \sqrt{(6.9h + H_0)^2 + 12 \sum (-T_a)} , \quad (3)$$

где  $H$  — толщина льда,  $h$  — толщина снега,  $H_0$  — начальная толщина льда,  $\sum(T_a)$  — количество градусо-дней мороза, прошедшее с начала наблюдений.

Естественно, для каждого морского района, покрытого льдами, со своими специфическими климатическими условиями, формулы для расчета толщины льда могут различаться. В частности, для бухты Новик в результате обработки результатов всей совокупности наблюдений методом наименьших квадратов получена формула для расчетов толщины льда:

$$H = -0.0775 + 1.078h + \sqrt{(-1.062h + H_0)^2 - 2.8555(\bar{T}_a + 1.8)} . \quad (4)$$

В отличие от формул (2) и (3), мы учитывали прирост толщины льда за одни сутки. Здесь  $\bar{T}_a$  — среднесуточная температура воздуха.

В таблице приведены результаты расчетов толщины льда с использованием формул (2–4). Рассчитанные по формуле (4) величины  $H$  имели наименьшее отклонение от экспериментальных.

**Таблица.** Толщина морского льда, рассчитанная по формулам (2–4)

Дата		Толщина льда, см			
		Экспер. измер.	Расчет по формулам		
			2	3	4
2013 г.	06.02	52			52.3
	05.03	58	63.1	68.9	57.5
	11.03	55	63.7	69.7	57.8
	19.03	57	64.0	70.1	57.4
2014 г.	25.01	38			38.1
	20.02	48	5.28	65.8	45.7
	13.03	44	56.7	72.4	46.2
2015 г.	02.02	50			50.2
	07.02	51	52.1	53.3	52.3
	24.02	53	56.3	61.4	52.1
	28.02	55	56.8	62.1	57.8
2016 г.	07.02	36.5	40.3	65.3	38.5
	12.03	42.8	49.6	77.1	42.8

После четырехлетних наблюдений за изменениями жидкой и твердой фаз во льду стало очевидно, что пространственная структура припайного льда в Амурском заливе, как и содержание рассола в нем, в большей степени зависит от толщины снежного покрова, чем от температуры воздуха и ее изменений накануне отбора проб для исследования. Расслоение льда и образование узоров происходило только при толщине снежного покрова, составляющего не более 2% от толщины льда. Это отчетливо видно из представленных МРТ изображений льда.

Графики вертикальных изменений  $Q_i$  соответствовали таковым для солености и температуры, что было вполне ожидаемым. Важно отметить, что данные по  $Q_i$  и солености льда являлись результатом независимых определений и полностью коррелировали между собой. Это подтверждает ранее сделанный нами вывод, что содержание и соленость рассола тесно связаны между собой [4].

При сравнении особенностей тонкого однолетнего льда с толстыми многолетними льдами полярных районов был выявлен ряд отличительных признаков. Во-первых, сильно различается размер пор: в толстых льдах поры значительно меньше из-за низких температур. В Антарктических льдах рассол находится в виде капель диаметром около 40 мкм и случайным образом распределяется в объеме керна двухметрового льда [6]. Подобных «каплеобразных» ячеек в структуре льда Амурского залива мы не наблюдали. Это не удивительно, поскольку льды в полярных районах формируются в совершенно других, более суровых условиях, особенно льды материкового происхождения. Объединение ячеек в каналы по правилу «двух пятерок» ( $-5^{\circ}\text{C}$  и 5 епс) [10] в тонком однолетнем льду автоматически выполняется уже на начальной стадии его формирования.

Во-вторых, образование ветвистых кристаллических структур, наблюдаемых в тонком льду в отсутствии или при небольшой толщине «снежной рубашки», в толстых заснеженных льдах полярных районов маловероятно. Скорее всего, такие структуры можно отнести к метастабильному состоянию быстро формируемой структуры льда. Тем не менее причины возникновения древоподобных структур требуют дополнительных исследований, в том числе обсуждения океанологами и специалистами в области морфологии морского льда, т. к. в литературных источниках не содержится сведений о подобных явлениях. Не исключено, что на формирование подобных структур могут влиять неоднородные

электрические поля, возникающие при большой скорости нарастания льда, на границе твердой (пресной) фазы льда и рассола с высокой электропроводностью, а также другие факторы.

Следует обратить внимание, что характерный минимум температуры и солености в срединном слое льда полярных районов также имеет место в однолетних льдах (в наших наблюдениях это февральские льды), который переходил в максимум в весенний период, примерно в конце марта каждого года. Причины возникновения экстремумов ряда характеристик льда в срединном слое, возможно, приемлемы не только для тонкого льда Амурского залива.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богородский В. В., Гаврило В. П. Лед. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 788 с.
2. Доронин Ю. П., Хейсин Д. Е. Морской лед. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 318 с.
3. Мельниченко Н. А., Михайлов В. И., Чижик В. И. Изучение температурной зависимости относительного содержания жидкой фазы в замороженной морской воде импульсным методом ЯМР // Океанология. 1979. Т. 19 № 5. С. 811-814.
4. Мельниченко Н. А., Стунжас П. А. О процессах замерзания морской воды по данным лабораторных измерений методом ядерного магнитного резонанса // Океанология. 2014. Т. 54. № 6. С. 1-9.
5. Харитонов В. В. Некоторые результаты измерения толщины ровного льда на дрейфующей станции «Северный полюс-38» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2. Вып. 96. С. 103-110.
6. Callaghan P. T., C. D. Eccles. NMR studies on Antarctic sea ice // Bulletin of Magnetic Resonance. 1996. 18 (1-2). P. 62-64.
7. Cox G. F. N., Weeks W. F. Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice Samples // J. Glaciology. 1983. V. 29. № 102. P. 306-316.
8. Eicken H., Bock C., Witting R, et al. Magnetic resonance imaging of sea-ice pore fluids: method and thermal evolution of pore microstructure // Cold Regions Science and Technology. 2000. V. 31. P. 207-225.
9. Galley R. J., Else B. G. T., Geifus N.-X., Hare A. et al. Imaged brine inclusions in young sea ice — Shape, distribution and formation timing // Cold Regions Science and Technology. 2015. V. 111. P. 39-48.
10. Golden K. M., Eicken H., Hiaton A. et al. Thermal evolution of permeability and microstructure in sea ice // Geoph. Res. Letter. 2007. V. 34. L6501.
11. Mensel M. I., Han S.-I. Stapf S. et al. NMR characterization of pore structure and anisotropic self-diffusion in salt water ice // Magnetic Resonance Imaging. 2008. V. 26. № 2. P. 254-260.
12. 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. Techn. 2005. V. 42. P. 96-105.

## VERTICAL DISTRIBUTION OF BRINE AND VOLUME STRUCTURE THIN ONE YEAR ICE AMUR BAY ON BASE NMR AND MRT DATES

© 2019 N. A. Mel'nichenko<sup>1\*</sup>, A. V. Tyuveev<sup>1</sup>, A. Yu. Lazaryuk<sup>2</sup>, V. E. Savchenko<sup>1</sup>, E. V. Kustova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

<sup>2</sup> V.I. Il'ichev Pacific Ocenogical Institut FEB RAS, Vladivostok, Russia

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

Received June 04, 2015

Revised version received October 04, 2018

After revision February 05, 2019

It was studying distribution of liquid and solid phases in pores one year sea ice on Amur Bay with using NMR and MRT methods in period 2013–2016. According to findings predominant factor in ice structure formation is snow cover. The patterns of brine content and solid phase distribution are considered in interdependence with air temperature and corresponding ice layer temperatures in compliance with preceding weather conditions. Differences in vertical profiles for temperature and salinity for winter and spring periods was marked. The main features of spatial phase distribution in thin ice in comparison Arctic ice are presented. Just snow cover effects on ice parameters was demonstrated using data 2013–2016. The relationship of interlayings number in ice with its thickness, air temperature, and snow cover thickness is discussed. The main features of spatial phase distribution in thin ice in comparison Arctic ice are presented. The empirical relation for calculations thin sea ice thickness was suggested.

**Keywords:** sea ice, ice space structure, NMR and MRT methods