

УДК 536.51.083

А.А. ТАГИЛЬЦЕВ, М.Ю. ЧЕРАНЕВ, Р.А. ГОНЧАРОВ, Г.П. ШВЕЦОВ

Средства исследования поля температуры ледяного покрова в акваториях залива Петра Великого

Информация о распределении температуры в толще ледяного покрова дает представление о теплофизических свойствах льда, процессах его развития и разрушения на данной акватории и имеет большое значение в гидрологии, океанологии, при проектировании и эксплуатации инженерных сооружений. Для получения текущей информации о распределении температуры в ледяном покрове и ее градиентах разработаны и апробированы в натуральных условиях зал. Петра Великого технические средства, позволяющие проводить прямые контактные измерения как в толще льда, так и в извлекаемых из нее кернах.

Ключевые слова: термогирлянда, терморамма, температура, ледяной покров, теплопроводность, градиент температуры.

Means of investigation of the temperature field in the ice cover of the water areas of the Peter the Great Bay.
A.A. TAGILTSEV, M.Yu. CHERANEV, R.A. GONCHAROV, G.P. SHVETSOV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

Knowledge of temperature distribution within ice cover makes it possible to elucidate ice thermal properties, processes of its development and destruction in a studied area; therefore it is of great importance in hydrology, oceanology, and in designing and operation marine engineering structures. To obtain a current data on temperature distribution and its gradients in ice cover, technical devices have been developed and tested in the natural conditions of the Peter the Great Bay, which allow to take direct contact measurements both in ice cover and in extracted cores.

Key words: thermo-string, thermo-matrix, temperature, ice cover, thermal diffusivity, thermal gradient.

В зимний сезон в прибрежных районах зал. Петра Великого наблюдаются сплошные поля морского льда. Размеры и физико-химические параметры образующегося ледяного покрова изменяются в широких пределах в процессе его эволюции, оказывая значительное влияние на водные массы и экологическое состояние залива. Масса образующегося в море льда, с одной стороны, определяется главным образом температурой воздуха и воды, а с другой – теплофизическими свойствами льда: теплотой кристаллизации, теплопроводностью, теплопроводностью и теплоемкостью. Знания теплоты плавления и теплопроводности в комплексе с другими тепловыми характеристиками морского льда необходимы для теоретических расчетов теплового состояния ледяной толщи и происходящих в ней физических процессов, например образования в ледяном покрове трещин (потери им прочности и целостности), а также для инженерных расчетов величины усилий при воздействии льда на морские и прибрежные сооружения [4]. Учитывая это, а также принимая во внимание перспективы освоения акваторий залива, которые в ближайшие годы связаны с созданием целого ряда гидротехнических и портовых сооружений,

*ТАГИЛЬЦЕВ Александр Анатольевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, ЧЕРАНЕВ Михаил Юрьевич – ведущий инженер, ГОНЧАРОВ Рудольф Арнольдович – ведущий инженер, ШВЕЦОВ Геннадий Павлович – ведущий инженер (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: atagiltsev@poi.dvo.ru

объектов марикультуры, развитием и обустройством баз отдыха и туризма, представляется своевременной постановка задачи непрерывного, желательного дистанционного, контроля температуры ледяного покрова, подготовки необходимых для этого средств наблюдения.

Несмотря на важность изучения и контроля состояния ледяного покрова, в опубликованных по этой теме работах отмечается, что сложность и дороговизна непосредственных измерений существенно сужает рамки исследований [2, 11]. Требования безопасности, условия организации и проведения работ на льду делают их эпизодическими, в результате «в настоящее время отсутствует методика использования результатов мониторинга температуры для оценки изменений напряженного состояния ледовой пластины. Нет ясности также в вопросах постановки самого мониторинга: где и сколько нужно поставить автономных измерителей, чтобы обеспечить необходимый объем информации об изменениях температурного поля» [3, с. 90].

Сейчас ситуация изменилась, широкодоступные современные технологии радиоэлектроники и связи вполне позволяют организовать непрерывные и надежные дистанционные наблюдения. Если ранее для измерения температуры льда использовали лабораторные термометры, например ТЛ-4 со шкалой от -30 до 20 °С и ценой деления $0,1$ °С, то практически все современные средства наблюдения, используемые для данной задачи, основаны на применении термисторных датчиков или цепочек из них. Так, при проведении экспериментальных исследований, выполненных в рамках российско-германского проекта «Система моря Лаптевых–2000», распределение температуры в кернах льда изучалось с помощью термометров ТЛ-4 [10], на станции Беллинсгаузен в Антарктике использовались прецизионные цифровые термометры с разрешением и точностью $0,1$ °С [5], а на оз. Байкал при исследовании связи температурных колебаний с элементарными стадиями нарушения его целостности применялся автономный измеритель температуры с цепочкой вертикально распределенных термисторов [3].

Примером другого типа современных средств наблюдений является ледовый масс-балансовый буй (Ice Mass Balance Buoy) разработки Metocean Data Systems (Канада, США), с помощью которого, начиная с дрейфующей станции СП-37, были организованы измерения профиля температуры снежно-ледяного покрова и прилегающих дециметровых слоев воды и воздуха (коса термисторных датчиков температуры длиной 4 м с интервалом расстановки 10 см) (<http://www.metocean.com>).

Как показывает практика натурных исследований, разнообразие их условий, масштабов, а также характеристик ледяных покровов все же диктует необходимость создания специальных средств измерений, в большей степени отвечающих поставленной задаче и обеспечивающих достаточный объем экспериментальных данных, особенно в периоды становления и разрушения льда.

Устройства, разработанные в ТОИ ДВО РАН

Учитывая возрастающее внимание к ледовым исследованиям и задачи обеспечения работ, проводимых в ТОИ ДВО РАН по изучению динамики температурного поля ледяного покрова зал. Петра Великого, нами разработан ряд устройств, в которых реализован контактный многоканальный способ контроля температуры с возможностью длительного накопления данных, а также передачи их по кабелю или радиоканалу. В устройствах использованы цифровые температурные датчики DS18B20 (Dallas Semiconductor, США) интегрального исполнения, технические характеристики которых позволили реализовать модульный принцип построения устройств с общим для всех трактом регистрации, накопления и передачи данных при существенном упрощении электрической схемы. Кроме того, использование в устройстве цифровых температурных датчиков с известной и однородной метрологической характеристикой упростило также процедуру калибровки чувствительных элементов, а их малые габариты обеспечили достаточно низкую тепловую

инерционность датчиков. Особенности устройств являются многоканальность, автономность, возможность программирования режимов работы с адаптацией к решаемой задаче, хранение данных в энергонезависимой памяти и передача их по каналам связи с возможностью создания локальной сети. Сводная блок-схема разработанных устройств представлена на рис. 1, где показаны измерительные модули (*A, B, C*) и функционально общий для всех устройств регистрирующий модуль (*D*).

Состав и конструктивное исполнение разработанных устройств позволяют выполнять весь объем температурных исследований ледяного покрова: контроль приповерхностной температуры воздуха, температурного поля толщи льда, температурного поля сопряженных слоев воды. Регистрирующий модуль выполняет функции управления устройствами, накопления и хранения данных, обеспечения радиосвязи, источника электропитания. Состав регистрирующего модуля (рис. 1): 1 – микроконтроллер, 2 – память, 3 – часы реального времени, 4 – драйвер цифровой линии, 5 – радиомодуль, 6 – блок питания, 7 – последовательный порт компьютера, 8 – приемопередатчик радиоканала.

Себестоимость устройств, определяемая в большей степени ценой кабеля для термогирлянды и линии связи, невысока, что, учитывая непрерывное получение данных по радиоканалу, решает проблему их эксплуатации в стадиях становления и разрушения льда и даже допускает утрату устройства при форс-мажорных обстоятельствах.

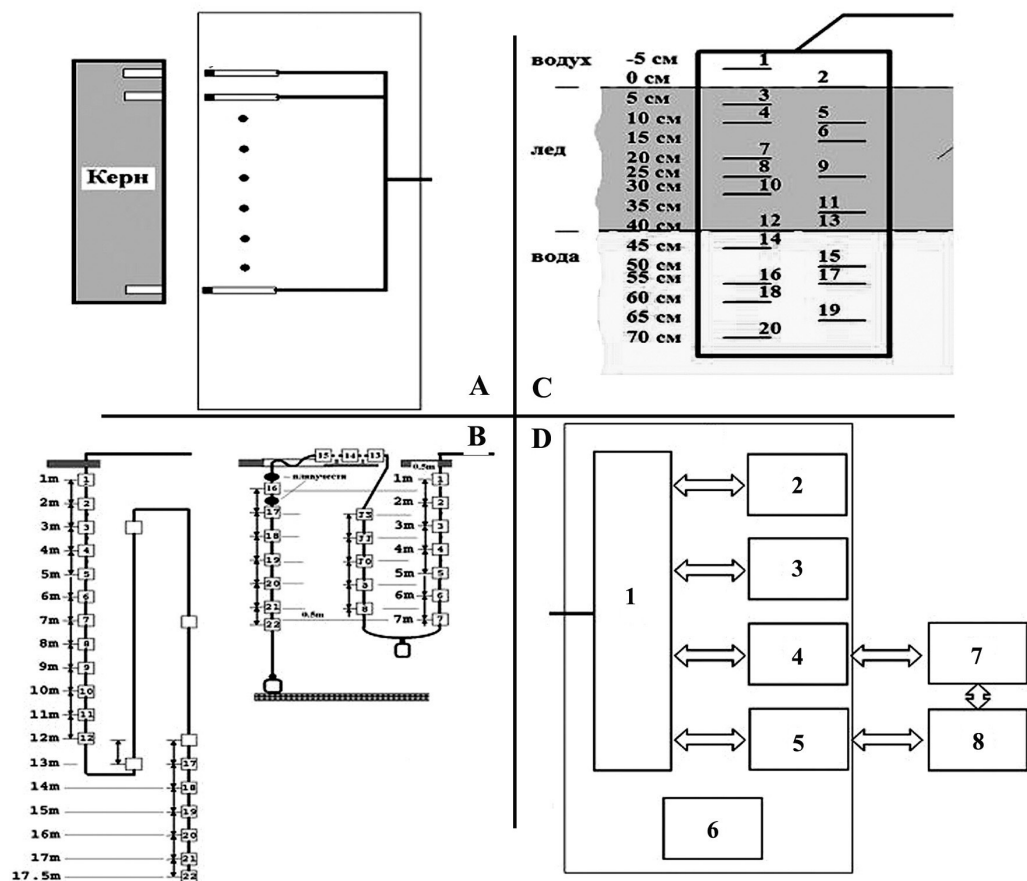


Рис. 1. Блок-схема устройств для измерения температуры льда: *A* – модуль многоканального устройства для измерения температуры льда, *B* – модуль термогирлянды и возможные варианты ее установки (указаны номера датчиков и глубина их положения), *C* – модуль терморамы (указаны номера датчиков и положение относительно поверхности льда), *D* – функционально общий для всех устройств регистрирующий модуль (пояснения в тексте)

Термогирлянда. Одним из разработанных устройств является цифровая термогирлянда, предназначенная для контроля вертикального профиля температуры в водном слое, в конструкцию и характеристики которой заложена возможность всесезонного применения. Она была апробирована при долговременных измерениях под ледяным покровом Амурского залива, при этом наблюдения с ее использованием, выполненные в феврале и марте, показали устойчивую температурную стратификацию среды с повышенной температурой в придонном слое [6, 9]. Термогирлянда выполнена в нескольких вариантах, отличающихся количеством термодатчиков (9–30), расстоянием между термодатчиками (от 0,1 до 10 м), степенью автономности, наличием или отсутствием радиоканала. Точность измерения температуры для всех вариантов исполнения термогирлянды – 0,1 °С. Программируемый выбор частоты измерений позволяет уменьшить влияние тепловых инерционных свойств (температурной постоянной) термогирлянды на результаты измерений.

Многоканальное устройство для измерения температуры льда. Данное устройство предназначено для измерения профиля температуры непосредственно в ледяной толще как путем вмораживания шупов в лед, так и введением их в подготовленный, извлеченный из него керн [8]. С его помощью регулярные измерения температуры в кернах льда производились в зимний период 2014/15 г. в бухте Новик (о-в Русский) на трех станциях (более 20 кернов) и в северной части Амурского залива на 6 станциях (более 30 кернов) [7].

Терморамы. Как показала практика измерений температуры льда, более высокая надежность, точность и информативность данных может быть получена с использованием матрицы термодатчиков, дублирующих измерения температуры на горизонте, а также находящихся в надледной и подледной областях. Для реализации такого подхода разработана и апробирована в зимних условиях конструкция терморамы, которая может быть как установлена в процессе становления льда, так и вморожена в полынье, в том числе, при необходимости, с последующей переустановкой в другую точку. Устройство оснащено 20 цифровыми датчиками DS18B20, расположенными в плоскости рамы группами с шагом 0,05 м по вертикали. Измерения температуры выполняются с программируемым интервалом времени и инструментальной погрешностью 0,1 °С, максимальная длительность непрерывной записи данных – 35 сут – может быть кратно увеличена.

Результаты и обсуждение

Если методики и процедуры измерений, осуществляемые с помощью термогирлянды и устройства контроля температуры в кернах льда являются традиционными, то с помощью устройства «терморамы», вмороженного в полынье, была реализована новая методика обработки данных с усреднением по горизонтально разнесенным датчикам и получены новые оригинальные результаты. Непрерывные 25-суточные измерения температуры в автономном режиме с сохранением данных в энергонезависимой памяти регистрирующего модуля были проведены в феврале–марте 2016 г. в бухте Алексеева (о-в Попова). На рис. 2 приведены результаты обработки данных в виде поля температур в трех сопряженных средах – воздухе, льде и слое воды подо льдом, а также температура воздуха за этот период.

Из работ [1–4] следует, что наибольшие градиенты температуры наблюдаются в верхних слоях льда. В нижних слоях они меньше и совсем незначительны в средних, так как средние слои, как правило, отличаются наибольшей плотностью, и на них приходится минимум суммарного относительного объема включений воздуха и жидкой фазы. Приведенная на рис. 2В структура пространственно-временной изменчивости температуры льда на акватории бухты Алексеева в целом согласуется с традиционными представлениями, в то же время отражая динамику температурных полей в точке постановки терморамы.

Представляет интерес сопоставление показаний датчиков с фактическими метеоусловиями во время наблюдений. Из данных метеостанции «Владивосток-гора»

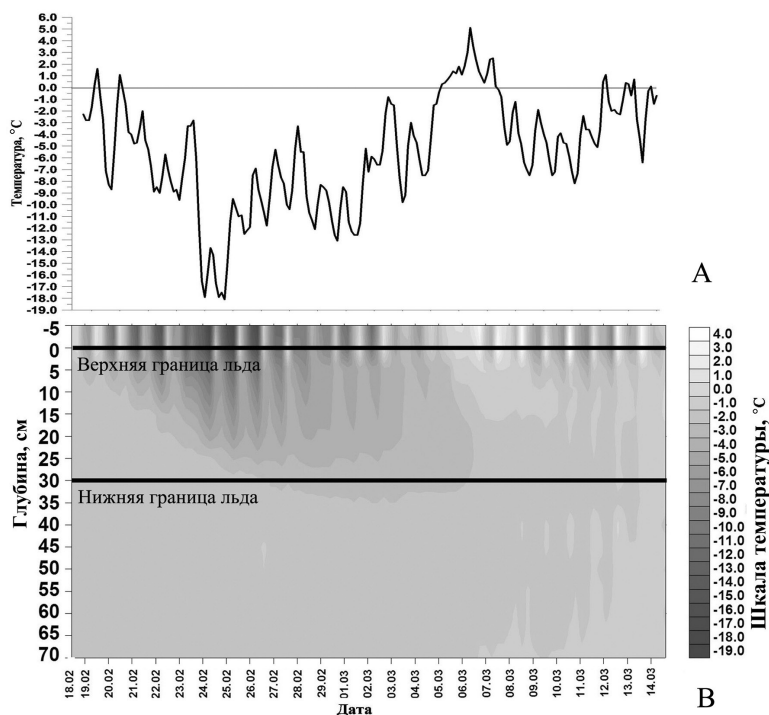


Рис. 2. Погодные условия в районе Владивостока с 18.02 по 14.03.2016 г.: *A* – температура воздуха по данным метеостанции WMO ID = 31960 (Владивосток-гора, www.rp5.ru), *B* – пространственно-временная изменчивость температуры льда и прилегающих воздушной и водной сред в бухте Алексеява о-ва Попова

WMO_ID = 31960 следует, что пик низких температур приходился на 23–24 февраля (рис. 2*A*). Следствием понижения температуры воздуха стало, с некоторым запозданием, снижение средней температуры во всей толще льда, которое происходило синхронно с суточными колебаниями воздуха, причем максимум изменений пришелся на верхний и средний слои. Нижний слой ожидаемо подвергся наименьшим изменениям. Отчетливо наблюдается фазовый сдвиг (временное запаздывание изменения температуры) по слоям, величина которого определяется теплопроводностью каждого слоя. При потеплении с 5 по 7 марта (температура воздуха не опускалась ниже нуля) размах суточных колебаний температуры льда снижается до минимальных значений, и в дальнейшем (с 6 по 9 марта), как видно из рис. 2 и 3, среднесуточный градиент температуры во всей толще льда меняет знак на противоположный.

На рис. 3 приведена динамика градиента температуры в трех слоях льда. В литературе [1–4] явным образом не определяются правила выбора границ слоев, поэтому их толщина определена нами в 10 см. Динамика градиента в слоях ярко выражена на начальном этапе резких синоптических изменений (похолодание с 20 февраля по 2 марта и потепление с 5 по 9 марта). Здесь, в отличие от обычного соотношения градиентов в слоях, наблюдается превышение градиента в среднем слое относительно нижнего в течение времени (до 3 суток), необходимого для выравнивания температуры во всей толще льда. Такая динамика, видимо, является следствием небольшой толщины ледяного покрова (30 см) и характера его структуры в конце зимнего сезона.

Полученные с помощью терморамы данные позволяют, помимо расчета вертикальных градиентов температуры и анализа их пространственно-временной трансформации, также оценить теплофизические и прочностные характеристики ледяного покрова, однако без уточнения типов структуры льда, включения солей и воздушных пор эти оценки будут приближенными [2].

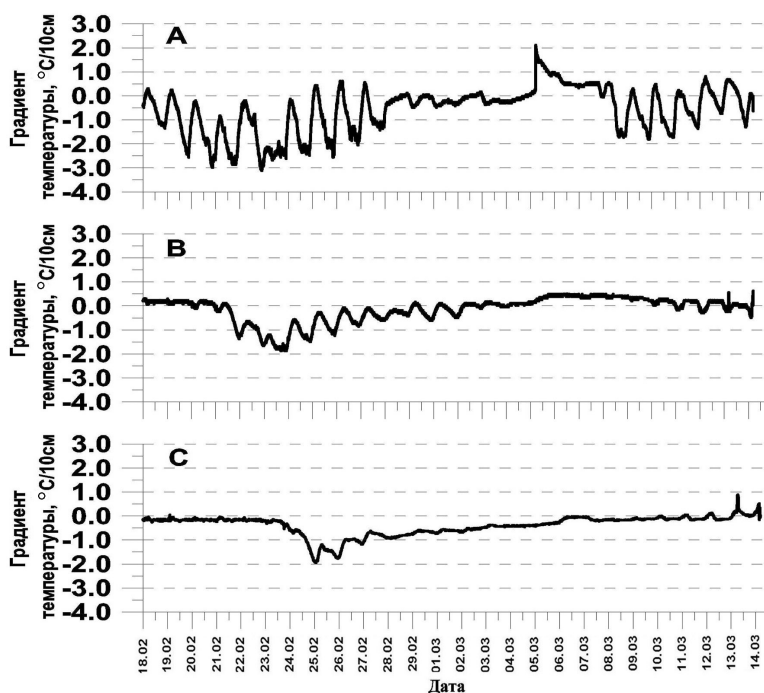


Рис. 3. Градиенты температуры в слоях ледового покрова за период с 18.02 по 14.03.2016 г. *A* – верхний слой (0–10 см), *B* – средний слой (10–20 см), *C* – нижний слой (20–30 см)

Более детальный количественный анализ данных и его интерпретация выходят за рамки данной статьи, которая посвящена вопросам инструментального обеспечения ледовых исследований.

Заключение

Разработанные многоканальные устройства с использованием цифровых температурных датчиков показали новые возможности получения детальной информации о динамике температурного поля ледяного покрова как при оперативных, так и комплексных долговременных исследованиях. Дальнейшие работы по совершенствованию разработанных устройств, такие как дополнение состава модулем измерения толщины льда, снижение энергопотребления, реализация устойчивого радиоканала с элементами локальной сети, будут способствовать созданию эффективной системы мониторинга состояния ледяного покрова, адаптируемой к выбранной акватории.

Более чем 3-летний период успешной эксплуатации устройств доказал возможность получения с их помощью экспериментальных данных, не уступающих по качеству тем, что предоставляют современные зарубежные и отечественные средства. Разработанные устройства, обладая техническими характеристиками, не худшими, чем у современных аналогов, имеют положительные отличия – возможность комбинирования модулей, составляющих устройства, в зависимости от решаемой задачи и невысокую себестоимость, облегчающую тиражирование и, следовательно, развитие и расширение сети наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доронин Ю.П. Взаимодействие атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 286 с.
2. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 320 с.
3. Дучков А.Д., Истомин В.Е., Казанцев С.А. Температурный режим льда оз. Байкал и связанные с ним внутренние напряжения и смещения в ледяной плите // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10, № 1. С. 87–92.
4. Назинцев Ю.Л., Панов В.В. Фазовый состав и теплофизические характеристики морского льда. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. 84 с.
5. Репина И.А., Бобков С.А. Теплофизические свойства льда и разных типов открытой поверхности в районе Антарктического полуострова // Метеорол. и гидрология. 2007. № 9. С. 74–79.
6. Тагильцев А.А., Черанев М.Ю., Гончаров Р.А. Измерение вертикального профиля температуры подо льдом с использованием цифровой термогирлянды // Океанография залива Петра Великого и прилегающей части Японского моря: тез. докл. II науч. конф., Владивосток, ТОИ ДВО РАН, 15–17 мая 2013 г. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 33–34.
7. Тагильцев А.А., Лазарюк А.Ю., Черанев М.Ю., Гончаров Р.А. Многоканальное устройство для измерения температуры льда // Материалы докл. IX Всерос. симпоз. «Физика геосфер», Владивосток, 21–24 сентября 2015 г. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2015. С. 216–220.
8. Тагильцев А.А., Лазарюк А.Ю., Черанев М.Ю., Гончаров Р.А. Многоканальное устройство для измерения температуры льда. Полезная модель RU 155829 U1. Заявл. 29.04.2015; опубл. 20.10.2015 // Изобретения. Полезные модели. 2015. Бюл. № 29. – http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2015FULL/2015.10.20/Index_ru.htm (дата обращения: 27.11.2017).
9. Тагильцев А.А., Черанев М.Ю., Гончаров Р.А. Устройство для измерения профиля температуры. Полезная модель RU 139660 U1. Заявл. 10.01.2014; опубл. 20.04.2014 // Изобретения. Полезные модели. 2014. Бюл. № 11. – http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2014FULL/2014.04.20/Index_ru.htm 9 (дата обращения: 27.11.2017).
10. Тышко К.П., Ковалев С.М. Некоторые особенности температурного режима ледяного покрова арктических морей в середине весеннего периода // Метеорол. и гидрология. 2005. № 6. С. 92–103.
11. Четырбоцкий А.Н. Эволюция толщины припая замерзающих морей // Метеорол. и гидрология. 2006. № 3. С. 79–88.